

Diplomová práce

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavební mechaniky

Numerické modelování testu chloridové penetrace

Numerical modeling of the chloride penetration test

Študent:

Bc. Michal Rajčan

Vedúci diplomovej práce:  
Ph.D.

doc. Ing. Petr Konečný,

Ostrava 2018



# Zadání diplomové práce

Student:

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T037 Konstrukce staveb

Téma: Numerické modelování testu chloridové penetrace  
Numerical modeling of the chloride penetration test

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Práce bude zaměřena na numerickou simulaci testu chloridové penetrace (např. NT BUILD 443 [1]). Cílem práce je příprava modelu umožňujícího ověřit vliv odběru chloridového profilu na další pronikání chloridů v bezprostředním okolí odběru.

Model pro simulaci pronikání chloridů bude připraven na bázi difuze, a to optimálně ve 3D popř. ve 2D. Jako základ bude použit postupně vyvíjený 2D numerický model [2,3,4] u něhož se ověří možnost rozšíření do 3D. V případě komplikací s úpravou kódu na bázi [2,3,4] do 3D bude užito postupu na bázi komerčního MKP software.

3D model difuze chloride bude sloužit k simulaci penetračního experimentu a umožní ověřit vliv sekvenčního odběru chloridového profilu na pronikání chloridů.

Práce bude sestávat z numerických analýz, které budou vyžadovat úpravu kódu použitého software [2,3,4] připraveného v prostředí Matlab [5]. Ke kontrole přesnosti se doporučuje užít vhodný analytický model [6], experimentální výsledky [2] a postup na bázi komerčního software (např. ANSYS [7]).

Výstupem práce bude 3D model pronikání chloridů při penetračním experimentu a modelová ukázka simulace experimentu s opakovaným odběrem chloridových profilů.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NT BUILD 443. Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration. Espoo [Finland]: Nordtest, 1995.
- [2] P. Konečný. Vyhodnocení trvanlivosti železobetonových mostovek s ohledem na vliv chloridů a na rozptyl vstupních parametrů, Habilitační práce, Fakulta stavební VŠB-TUO, 2015.
- [3] P. Lehner. Pravděpodobnostní analýza s využitím izoparametrických konečných prvků, Ostrava : Diplomová práce, Fakulta Stavební, VŠB-TUO, 2013.
- [4] P. Lehner. Numerické řešení 2D difuze chloridů užitím MKP. Ostrava : Bakalářská práce, Fakulta Stavební, VŠB-TUO, 2012.
- [5] MatLab a MatLab, 7.10.0.854. 2010. místo neznámé : numerical computing environment, developed by MathWorks.
- [6] P.S. Mangat a B.T. Molloy. Prediction of Long Term Chloride Concentration in Concrete. Materials and Structures. 1994, vol. 27, issue 170, s. 338-346.
- [7] Ansys 14.0, Release Documentation dostupné na: <<http://www.ansys.com>>, 2013.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Konečný, Ph.D.**

Datum zadání:

Datum odevzdání:

---

doc. Ing. Martin Krejsa, Ph.D.  
*vedoucí katedry*

---

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.  
*děkan fakulty*



**Prehlásenie študenta**

Prehlasujem, že som celú diplomovú prácu aj s prílohami vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave .....

.....

podpis študenta

## Diplomová práca

Prehlasujem:

- Bol som oboznámený s tým, že na mojej diplomovej práci sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, hlavne § 35 – užitie diela v rámci občianskych a náboženských obradov, v rámci školských predstavenia užitie diela školného a § 60 – školné dielo.
- Beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB-TUO) má právo neplatené ku svojej vnútornej potrebe diplomovú prácu použiť (§ 35 odst.3).
- Súhlasím s tým, že údaje o diplomovej práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.
- Bolo zjednané, že s VŠB-TUO, v prípade záujmu z ich strany, uzavriem licenčnú zmluvu s oprávnením použiť dielo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bolo zjednané, že použitie svojho diela – diplomovou pracou alebo poskytnutou licenciou k jej využitiu môžem iba zo súhlasom VŠB – TUO, ktorá je oprávnená v takomto prípade odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB – TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do ich skutočnej výšky).
- Beriem na vedomie že odovzdaním svojej práce súhlasím zo zverejnením svojej práce podľa zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisov, bez ohľadu na výsledok jej obhajoby.

V Ostrave .....

.....

podpis študenta

## **Anotácia**

Trvanlivosť železobetónových konštrukcií ktoré sú vystavené pôsobeniu agresívnych látok ako sú posypové soli je z dlhodobého hľadiska ohrozená koróziou výstuže ktorá je spôsobená prenikaním chloridových iontov do betónu.

Diplomová práca je zameraná na vytvorenie 3D modelu, ktorý simuluje prenikanie chloridov do betónu. V práci je využitý algoritmus, ktorý je vytvorený v prostredí Matlab a je porovnávaný s výsledkami s komerčného softwaru Ansys Mechanical APDL a Ansys Workbench.

Ďalej sú vytvorené modely ktoré využívajú časovo závislý difúzny koeficient a ktoré porovnáваме s výsledkami s laboratórnych meraní. Cele meranie a modelovanie prebieha na 2 typoch betónoch.

## **Kľúčové slová**

Difúzia chloridov, MKP, difúzny súčiniteľ, nestacionárny úloha, betón

## **Annotation**

The durability of reinforced concrete structures exposed to aggressive substances such as spreading salts is threatened in the long run by the corrosion of the reinforcement caused by the penetration of chloride ions into the concrete.

The master thesis is focused on the creation of a 3D model simulating the penetration of chlorides into concrete. The algorithm used in the Matlab environment, which is compared to the results with the commercial software Ansys Mechanical APDL and Ansys Workbench.

Furthermore, model using a time-dependent diffusion coefficient is created and compared to laboratory measurements. Measurement and modeling takes place on 2 types of concrete.

## **Key words**

Chloride diffusion, FEM, diffusion coefficient, non-stationary task, concrete.

## Obsah

1.	Úvod .....	12
1.1.	Chloridová penetrácia železobetónovou konštrukciou.....	12
1.2.	Metóda konečných prvkov .....	13
1.3.	Nadväznosť na predchádzajúce práce .....	14
2.	Ciele diplomovej práce.....	16
2.1	Rozsah diplomovej práce .....	16
3.	Laboratórne meranie .....	18
3.1	Analýza a chloridového profilu.....	18
3.1.1	Príprava vzorkou .....	19
3.2	Analýza vzorkou .....	20
3.3	Výpočet difúzneho súčiniteľa $m$ -faktor.....	22
4.	Voľba konečného prvku .....	24
4.1	Popis trojuholníkového prvku .....	24
4.2	Príklad .....	26
4.3	Povrchová koncentrácia .....	28
5.	Porovnanie výsledkov .....	30
5.1	Porovnanie s 1D rovnicou difúzie .....	30
5.2	Program ANSYS Mechanical APDL v porovnaní s 2D úlohou .....	32
5.2.1	Zaťaženie.....	32
5.2.2	Tvorba modelu .....	33
5.3	Program ANSYS Workbench v porovnaní s 2D úlohou.....	37
5.3.1	Tvorba modelu .....	37
5.4	Výsledky.....	39
6.	Riešený príklad.....	47
6.1	Časovo závislý difúzny koeficient .....	47
6.1.1	Difúzny proces .....	48

## Diplomová práca

6.1.2 Vývoj difúzneho súčiniteľa v čase .....	48
6.2 Zaťaženie.....	49
6.3 Porovnanie výsledkov .....	49
7. Záver.....	56
8. Zoznam použitej literatúry .....	57
9. Prílohy .....	59

## Zoznam použitého značenia

C	matica kapacity
$C_0$	efektívna (počiatočná) koncentrácia rozpustiteľných chloridových iontov [%] na povrchu vzorku
$C_i$	koncentrácia chloridových iontov na pozadí konštrukcie
$C_{th}$	limitná koncentrácia chloridových iontov (chloridový prach) [%]
$C_s$	koncentrácia chloridových iontov konštrukcii.
$C_{x,t}$	koncentrácia chloridových iontov [%] v hĺbke x [m] v čase t [s]
$D_c$	difúzny súčiniteľ chloridových iontov v betóne [ $m^2s^{-1}$ ]
$D_{c,(t)}$	časovo závislý difúzny súčiniteľ betónu [ $m^2s^{-1}$ ]
$D_{c,ref}$	referenčný (počiatočný) difúzny súčiniteľ betónu [ $m^2s^{-1}$ ]
FA	množstvo popolku v zmesi (z anglického fly ash) [%]
K	matica vodivosti
N	interpolačná bázo­vá funkcia
SG	množstvo trosky v zmesi (z anglického slag) [%]
b	šírka betónového vzorku [m]
c	merná tepelná kapacita [ $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ]
h	výška (hrúbka) betónového vzorku [m]
m	materiálová konštanta [-]
t	čas [s]
$t_{ref}$	referenčný čas pre časovú úlohu difúzie [den]

## Grécke symboly

$\rho$	hustota materiálu [ $kg.m^3$ ]
--------	--------------------------------

## Ostatné symboly

$\frac{\partial Q}{\partial t}$	parciálna derivácia podľa času t
$\frac{\partial Q}{\partial x}$	parciálna derivácia podľa rozmeru x

## 1. Úvod

V stavebníctve sa stále viac dorazu kladie na udržateľnosť a životnosť konštrukcií ako aj na údržbu a rekonštrukciu. Udržateľnosť je odvodená od požiadaviek zaistenia udržateľného rozvoja Zeme. Hodnotenie udržateľnosti budovy spočíva v hodnotení nárokov budovy na jej výrobu, prevádzku a aj jej zbúranie a likvidáciu vzniknutého odpadu.

Pri životnosti konštrukcií hra veľkú rolu prostredie v akom sa nachádza a látky ktoré toto prostredie obsahuje. Jednu z najvýznamnejších rolí v tomto smere spôsobuje prenikanie posypových solí cez krytie vozovky ku oceľovej výstuži, ktorý môže znížiť únosnosť výstuže až na kritickú hodnotu pri ktorej môže nastať kolaps celej konštrukcie.

Používanie posypových solí k zaistieniu zjazdnosti a schodnosti vozoviek, chodníkov a verejných komunikácií je v našej zemi, rovnako ako v ostatných zemiach Európskej únie považované za samozrejmosť. Dlhodobým používaním bolo zistené, že chlorid sodný, tj. bežná kuchynská soľ je najvhodnejším posypovým prostriedkom, pretože je veľmi lacný a navyše nespôsobuje veľké škody na životnom prostredí. V dnešnej dobe nie je možné naraz prestať s používaním posypových solí a preto je nutné posúdiť vplyv týchto solí a naučiť sa konštrukcie pred ich nepriaznivým vplyvom chrániť. V literatúre, zabývajúcej sa betónom alebo betónovými výrobkami nie je chlorid sodný uvádzaný ako látka škodlivá priamo betónu. O jeho škodlivosti sa píše iba v spojení s koróziou oceľovej výstuže v betóne. Najväčšie problémy môže spôsobiť práve na železobetónových mostoch.

Práca je zameraná na numerickú simuláciu testu chloridovej penetrácie, pričom cieľom práce je príprava modelu umožňujúceho overiť vplyv odberu chloridového profilu na ďalšie prenikanie chloridov v bezprostrednom okolí odberu. Model bude pripravený optimálne v 3D prípadne v 2D, kde ako základ pre vyvíjanie 3D modelu budem použitý numerický model s práce *Numerické řešení 2D difúze chloridů pomocí MKP* [1]. 3D model difúzie bude slúžiť k simulácií penetračného experimentu a umožní overiť vplyv sekvenčného odberu chloridové profilu na prenikanie chloridov

### 1.1. Chloridová penetrácia železobetónovou konštrukciou

V dôsledku karbonizácie sa znižuje prirodzená vysoká alkalita betónu (pH12,5), ktorá chráni výstuž pred koróziou. Po čase, keď je konštrukcia vystavovaná chloridom, klesne pH betónu pod 9. Nastane fáza, kedy korózia neprebíha, ale betón stratil svoju ochrannú schopnosť. Akonáhle betónom prechádza voda a kyslík, začína postupný proces korózie



výstuže. Jej produkty majú väčší objem, než pôvodná oceľ a svojim tlakom spôsobujú tvorbu trhlín, čím proces ešte urýchlia, odlupujú sa krycie vrstvy a betón stráca svoje kvality. Rýchlosť rozvoja korózie výstuže závisí na hutnosti betónu a i na prítomnosti chloridov.

Proces prenikania solí do betónu je spôsobený difúznym dejom. Difúzia je jav kedy častice jednej látky samovoľne prenikajú medzi častice druhej látky. Je to proces, ktorým sa vo vnútri viaczložkovej sústavy dosahuje rovnomerné rozdelenie koncentrácií.

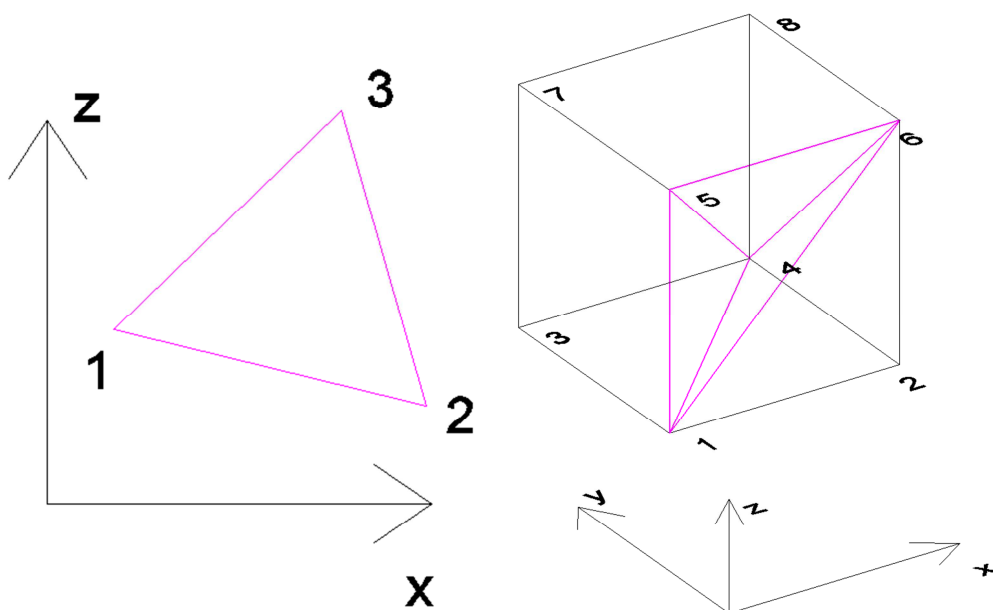


*Obrázok 1.1 Vplyv korózie na betón*

## **1.2. Metóda konečných prvkov**

Metóda konečných prvkov ktorá je použitá pre výpočet numerického modelovania je numerická metóda slúžiaca na simuláciu priebehov napätia, deformácii, vlastných frekvencií, prúdenie tepla, javov elektromagnetizmu, prúdenie tekutín a pod. na vytvorenom fyzikálnom modeli. Jej princíp spočíva v diskreditácii spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvkov, pričom zisťované parametre sú určované v jednotlivých uzlových bodoch. Hoci sú princípy tejto metódy známe už dlhšiu dobu, k jej masovému využitiu došlo až s nástupom modernej výpočtovej techniky.

V našom prípade sa snažíme rozšíriť už existujúci výpočet prenikania chloridov z 2D modelu do 3D a overiť si správnosť fungovania, najprv na 2D modeli ktorý bude zaťažovaný zo všetkých strán. Bude treba previesť trojuholníkový lineárny konečný prvok na priestorový pravidelný štvorsten ktorý sa v kocke nachádza presne päť krát (vid'. obr.1.2).



Obrázok 1.2 Transformácia konečného prvku z 2D do 3D

Snaha o rozšírenie numerického modelu do 3D umožní prehľadnejšie čítanie výsledkov a prehľadnejší vplyv prenikanie chloridov cez trhlinu. Pri väčšom počte konečných prvkoch rastie presnosť, ale tiež výpočetná náročnosť.

### 1.3. Nadväznosť na predchádzajúce práce

Bakalárska práca *Numerické řešení 2D difúze chloridů pomocí MKP* [1] sa, zaoberala difúznym procesom u železobetónových mostoviek, pričom konštrukcia bola zaťažovaná zhora, alebo zhora a z jednej strany. Táto práca popisovala algoritmus pre výpočet nelineárnej difúzie s využitím časovej diskreditácie, kde bol odvodený lineárny trojuholníkový konečný prvok upravený pre teplotne-difúziu analógiu. Keďže mal algoritmus uspokojivé výsledky ktoré boli porovnávané s komerčným MKP programom ANSYS, a 1D rovnicou difúzie môžeme ho využiť pre ďalší rozvoj a pochopenie chloridovej penetrácie.

Ďalej bude práca nadväzovať a čerpať s práce pána docenta Petra Konečného *Vyhodnocení trvanlivosti železobetonových mostovek s ohledem na vliv chloridů a na rozptyl vstupních parametrů* [2]. Hodnoty ktoré boli získané laboratórnym meraním budú využité pre dopočítanie dôležitých údajov potrebných pre ďalší výpočet, ktorý bude prebiehať na dvoch vzorkách betónoch OPC (klasický betón) a HPC (vysokopevnostní betón) (Obr. 1.3).

Celý algoritmus bude znova implementovaný do programovacieho prostredia Matlab [5]. Prvej fáze bude program pre výpočet 2D difúzie rozšírený na možnosť zaťažiť prvok zo

všetkých strán a výsledky sa budú následne porovnávať s laboratórnymi meraniami. Správnosť fungovania numerického riešenia sa overí programom ANSYS. Následne budem overovať, či je možné rozšíriť existujúci 2D výpočet do 3D s využitím konečného prvku v tvare pravidelného štvorstena.



*Obrázok 1.3 Laboratórne vzorky betónoch OPC (vľavo) a HPC (vpravo)*

## 2. Ciele diplomovej práce

Hlavným cieľom práce je príprava 3D modelu, ktorý umožňuje overiť vplyv odberu chloridového profilu na ďalšie prenikanie chloridov v bezprostrednom okolí odberu. Model pre simuláciu prenikania chloridov bude pripravený na bázy difúzie, optimálne v 3D, pričom ako základ nám poslúži algoritmus pre nestacionárnu 2D úlohu difúzie chloridov železobetónov mostovkou u ktorého sa overí možnosť rozšírenia do 3D.

Práca bude rozdelená do týchto základných krokov:

- a) Prvým krokom bude rozšíriť algoritmus v programe Matlab o možnosť zaťažiť prvok zo všetkých strán a zároveň vhodnými postupmi využiť experimentálne dáta [2], vďaka ktorým získame presnejší prehľad o základných údajoch ktoré budú stupovať do výpočtu 2D a následne 3D úlohy.
- b) Ďalším krokom bude snaha o postupné vyvíjanie do 3D úlohy v programe Matlab stávajúci 2D numerický model, ktorý by nám mal poskytnúť presnejšie výsledky ktoré budeme porovnávať s výsledkami z laboratórií.
- c) Tretím krokom prípravu modelu v 2D prípadne v 3D v komerčnom MKP programe ANSYS, ktorý bude zároveň slúžiť aj ako overenie správnosti výpočtu nášho algoritmu.

### 2.1 Rozsah diplomovej práce

V kapitole 1. *Úvod* je popísaný problém ktorý vzniká pri prenikaní chloridov do železobetónovej mostovky a znázornenie aký dopad môže mať na výstuž betónu. Ďalej je spomenutá metóda konečných prvkov ktorá nám bude slúžiť na výpočet prenikania chloridov a ktorá je tiež použitá v komerčných softwaroch ktoré využijeme na porovnanie výsledkov (Ansys Mechanical APDL, Ansys Workbench).

V kapitole 3. *Laboratórne meranie* je popísaný postup ako sa pripravujú vzorky ktoré budú zaťažované soľným roztok. Je popísaný odber prášku z rôznych hĺbok a metóda ako sa meria koncentrácia chloridov. Tiež sú popísané údaje ktoré boli namerané na 2 druhoch betónu. Rovnako je popísaný postup odvodenia m-faktora ktorý ovplyvňuje difúzny koeficient v čase.

V kapitole 4. *Voľba konečného prvku* je popísaný konečný prvok ktorý bol využitý pri výpočte v algoritme pre 2D model. Ďalej je znázornený príklad na ktorom budeme

posudzovať a porovnávať presnosť výpočtu s výsledkami s programu Ansys. Sú popísané všetky vstupné údaje, geometria a zaťaženie na model. V ďalšej kapitole 5. *Porovnanie výsledkov* je názorne ukázané postupy a tvorba modelov ktoré použijeme na kontrolu výsledkov. Tiež sme použili 1D rovnicu ktorou sme mohli najjednoduchšie porovnať výsledky. Ďalej je v tejto kapitole podrobne opísaný postup tvorby modelu 2D v programe Ansys Mechanical APDL a modelu 3D vytvoreného v programe Ansys Workbench. Nakoniec sú graficky a numericky porovnané výsledky pre všetky metódy výpočtu.

V ďalšej kapitole 6. *Riešený príklad* je popísaný postup odvodu časovo závislého difúzneho koeficienta. Popíšeme úpravu hodnôt získane z meraní a porovnáme ich s výsledkami získane s výpočetného algoritmu.

### 3. Laboratórne meranie

Laboratórne experimenty slúžia k overeniu odporu betónu voči prenikaniu chloridov na ktoré budú nadväzovať aj numerické simulácie na vykonávaní práci. Je možné použiť dlhodobé penetračné testy (betón je vystavený roztoku chloridov), poprípade zrýchlené experimenty využívajúceho elektrochemických metód (analýza s využitím elektrickej resistivity). Elektrochemickými metódami môžeme odhadnúť difúzny súčiniteľ betónu a ten potom použiť na predpoveď chovania experimentálnych vzorkov, ako je tomu v kapitole 4. kde je numerické modelovaná doba penetrácie do betónových diskov.

V kapitole 5 je spracované porovnanie výpočtu difúzneho súčiniteľa z chloridového profilu a následne simulácia úlohy, ako analytickým vzorcom, tak numerický v 2D a 3D.

#### 3.1 Analýza a chloridového profilu

V prípade merania na základe NT Build 443 pomocou dlhodobej skúšky, môžeme difúzni súčiniteľ získať, tak, že je potreba vystaviť betónovú vzorku pôsobeniu známej koncentrácie chloridového roztoku po určitý čas a následne získať koncentráciu chloridov v niekoľkých hĺbkach. Tiež je meranie difúzneho súčiniteľa počítané nedeštruktívnou metódou a to analýzou s využitím elektrickej resistivity kde sa vzorky umiestňujú do vápenej vody.

K analýze difúzneho súčiniteľa môžeme vybrať modifikovaný NordTest NT Build 443 [12]. Betónové vzorky sú ponorené do soľného roztoku po vhodnú dobu minimálne 35 dní). Tento test prirodzenej difúzie dáva vďaka veľmi vysokému gradientu hodnoty difúzneho koeficientu  $D_{nssd}$  (non-steady state diffusion coefficient) dostatok dát pre tvorbu krivky meraného profilu chloridov. Tá je následne preložená metódou najmenších štvorcov pre rovnicu /4.1/. Ak nie je dostupný vhodný nástroj pre brúsenie povrchu zo zberom betónového prachu podľa NT Build 443, môže sa postup modifikovať odberom chloridového profilu odvrtávaním podľa AASHTO T259. Vzhľadom k odberu vzorkou odvrtávaním je však nutné predĺžiť dobu expozície v soľnom roztoku tak, aby bolo rozdiely medzi jednotlivými chloridovými vrstvami výraznejšie.



*Obrázok 3.1 Vzorky umiestnené v roztoku NaCl*

### 3.1.1 Príprava vzorkou

- K testu sú použité vzorky o dostatočnom priemere cca. 100 mm a výške cca. 60 mm. (V našom prípade je priemer 150 a 148 mm)
- Čerstvo vybetónované vzorky sa nechajú zrieť 28 dní v roztoku z vápenej vody (lime-water). Roztok je vzduchotesne uzavretý a vyplnený až po okraj, tak aby nedochádzalo ku karbonizácii vody.
- Testovaný povrchu je urezaný tak, aby bol hladký a čistý.
- Epoxidovým povlakom sú uzavreté netestované povrchy.
- Vzorky sa ukladajú do roztoku 165 g NaCl na liter vody po dobu aspoň 90 dní. Nádoba zo vzorkami je zaplnená roztokom až po okraj a vzduchotesne uzavretá.
- Jeden kraj týždeň je soľný roztok premiešaný a jedenkrát za 5 týždňov je roztok vymenený.
- Odber vzorku či už brúsením alebo odvrtávaním je nutné previesť v dostatočnej vzdialenosti od okraja vzorku.
- Betónový prášok sa získava z niekoľkých vrstiev, tak aby bolo pokryté rozdelenie koncentrácie chloridov po výške. NT Build 443 uvádza aspoň 8.
- Podľa NT Build 443 je nutné z každej vrstvy získať aspoň 5 g betónového prášku.



### 3.2 Analýza vzorkou

Množstvo chloridov je možné určiť potenciometrickou titráciou (viď napr. ČSN EN 14629, NT Build 208).

- Obsah chloridov môžeme určiť podľa normy ČSN EN 14629 [13] (Stanovenie obsahu chloridov v zatvrdnutom betóne), a to potenciometrickou titráciou odmerným roztokom  $\text{AgNO}_3$ .
- Potenciometrická titračná krivka sa vyhodnotí pomocou 1.derivacie, kedy je určený bod ekvivalencie, ktorý odpovedá spotrebe titračného činidla  $\text{AgNO}_3$ .
- Následne možno vypočítat obsah Cl vo vzorku ako percentuálny pomer hmotnosti chloridov a betónu.

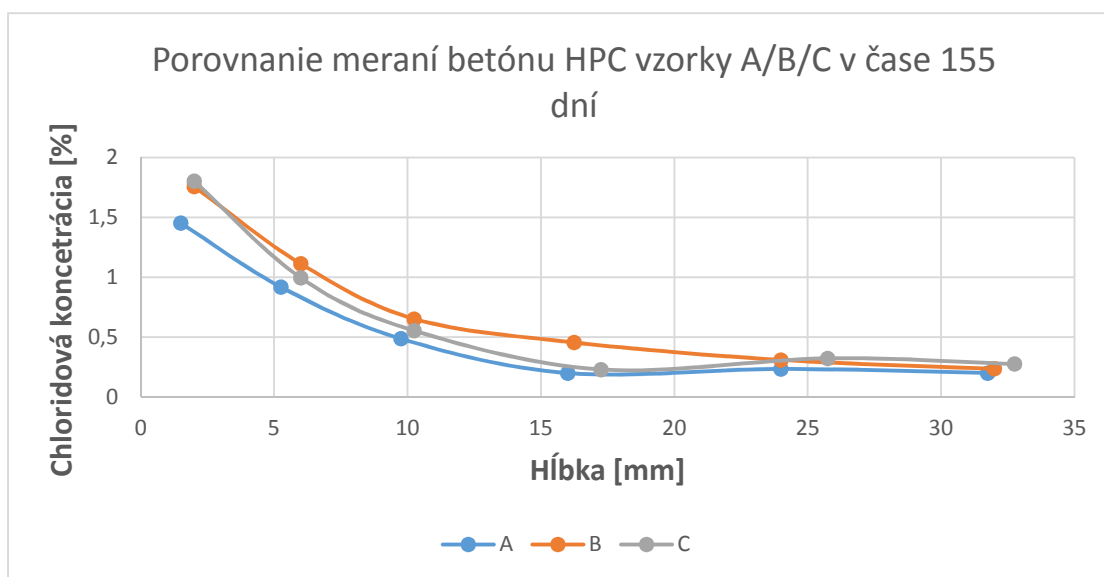
Chloridy sú d odobraného vzorku získane pomocou krátkeho prevarenia v 100 ml 5M  $\text{HNO}_3$  (Norma ČSN EN 14629). Presnosť skúšobnej elektródy je na úrovni cca 0,01% hmotnostných percent chloridov k hmotnosti betónu.

Výsledne profily koncentrácie chloridov sú uvedené v tabuľkách 3.1 a 3.2. Koncentrácia bola meraná v čase 155 dní a chloridový prach bol odoberaný po vrstvách ako je to uvedené v tabuľkách.

*Tabuľka 3.1 Povrchová koncentrácia chloridov v hĺbke a difúzny súčiniteľ v čase 155 dní pre betón OPC*

HPC - koncentrácia v čase 155 dní					
A		B		C	
Hĺbka [mm]	Koncentrácia [%]	Hĺbka [mm]	Koncentrácia [%]	Hĺbka [mm]	Koncentrácia [%]
1,5	1,452005219	2	1,756323786	2	1,802736765
5,25	0,918386916	6	1,112217836	6	0,995056931
9,75	0,487023364	10,25	0,65188998	10,25	0,553801838
16	0,199965856	16,25	0,455346191	17,25	0,229642514
24	0,234504836	24	0,309191713	25,75	0,32324015
31,75	0,200859841	32	0,2357215	32,75	0,276448109
$D_{c65} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	<b>6,49E-12</b>	$D_{c65} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	<b>1,03E-11</b>	$D_{c65} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	<b>5,66E-12</b>
$C_0 [\%]$	<b>1,5939</b>	$C_0 [\%]$	<b>1,9747</b>	$C_0 [\%]$	<b>2,0919</b>



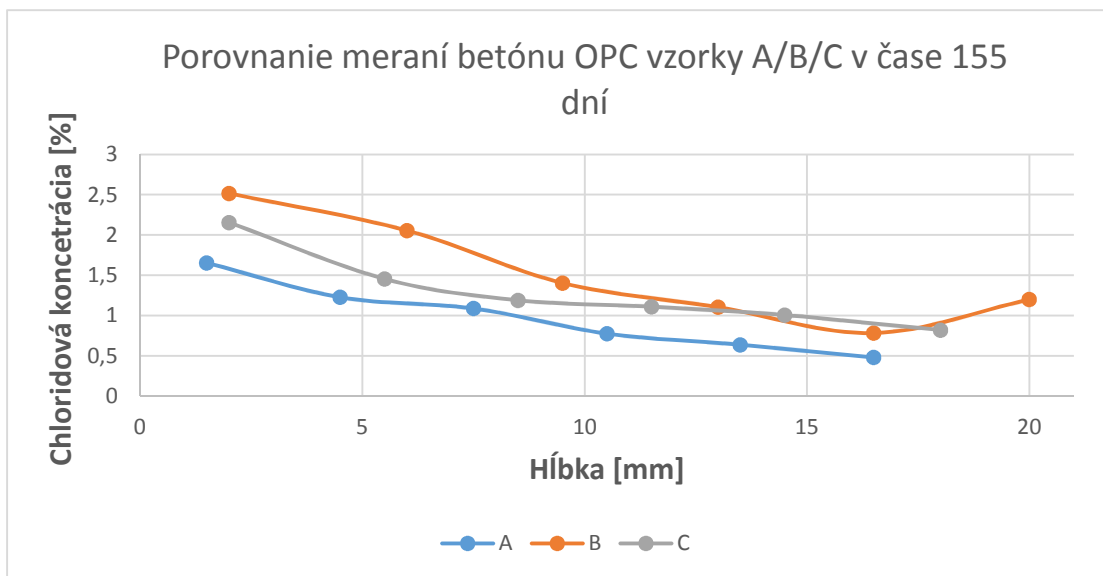


Obrázok 3.2 Grafické porovnanie výsledkov merania betónu OPC

Z chloridových profilu sú následne dopočítané iteráciou dva parametre, a to povrchová koncentrácia chloridov  $C_0$  a difúzny súčiniteľ  $D_c$ . Pri výpočtu je uvažované, že koncentrácia chloridov je na pozadí nulová. Tento predpoklad sa opiera o hodnoty koncentrácií najnižších profilov u väčšiny vzorkou, ktoré sa dostali na hranicu presnosti rovnako ako meranie v referenčnom vzorku, ktorý nebol vystavený chloridom.

Tabuľka 3.2 Povrchová koncentrácia chloridov v hĺbke a difúzny súčiniteľ v čase 155 dní pre betón OPC

OPC - koncentrácia v čase 155 dní					
A		B		C	
Hĺbka [mm]	Koncentrácia [%]	Hĺbka [mm]	Koncentrácia [%]	Hĺbka [mm]	Koncentrácia [%]
1,5	1,653433873	2	2,516268959	2	2,15522316
4,5	1,226889604	6	2,05463548	5,5	1,454115282
7,5	1,087221190	9,5	1,403229167	8,5	1,189776144
10,5	0,774572254	13	1,103060145	11,5	1,109007907
13,5	0,636112150	16,5	0,781863703	14,5	1,004832746
16,5	0,479656192	20	1,198120253	18	0,820138609
$D_{c65} [m^2.s^{-1}]$	<b>1,36E-11</b>	$D_{c65} [m^2.s^{-1}]$	<b>2,21E-11</b>	$D_{c65} [m^2.s^{-1}]$	<b>2,21E-11</b>
$C_0$ [%]	<b>1,7404</b>	$C_0$ [%]	<b>2,6290</b>	$C_0$ [%]	<b>2,1291</b>



Obrázok 3.3 Grafické porovnanie výsledkov merania betónu OPC

### 3.3 Výpočet difúzneho súčiniteľa $m$ -faktor

Výpočet difúzneho súčiniteľa, môžeme tiež určiť zrýchlene a to pomocou analýzy s využitím elektrickej resistivity. Toto je postup umožňujúci nedeštruktívne testovanie s možnosťou sledovania chovania daného vzorku v čase.

Difúzni súčiniteľ vypočítaný pre vybraný vek betónu je vstupný pre modelovanie časovo závislej odolnosti betónu voči prenikaniu chloridov v rovnici /6.2/. Meranie elektrickej povrchovej resistivity je prevadene na Fakulte stavební VŠB-TU Ostrava dostupnou Wennerovou sondou Resi. Táto metóda merania môže vykazovať pomerné veľký rozptyl, čiastočne kvôli heterogénosti testovaného materiálu a tiež v dôsledku, nie úplne kontrolovateľných kontaktných podmienok. Kontakt medzi elektródami a betónom sa udržiava cez mokré špongiu, kde je elektrické spojenie ovplyvnené úrovňou kontaktného tlaku a nasýtením špongie.

Sonda Resi používa k meraniu štyri elektródy vzdialené 5cm. Kontakt medzi elektródami a betónom je zaistený čiernymi hubkami, ktoré sú nasiaknuté vodou. Vzorky majú byť pre meranie nasýtené a na povrchu suché.

Získaním elektrického odporu, môžeme dopočítať difúzny koeficient. Výsledné difúzne koeficienty korelujú, čo môžu spôsobovať prímеси v betóne, ktoré ovplyvňujú

metódy použitého na výpočet difúzneho koeficienta. Difúzny koeficient sa vypočíta podľa vzťahu Nenst-Einsteina použiteľného na porézne materiály ako je betón [14]

$$D = \frac{RT}{Z^2 F^2} x \frac{t_i}{\gamma_i C_i \rho_{BR}} \quad /3.1/$$

Kde sú:

$D$	difúzni súčiniteľ [m <sup>2</sup> /s],
$R$	univerzálna plynová konštanta [J/K.mol],
$T$	absolútna teplota [K],
$Z$	valencia iontov [-],
$F$	Faradayova konštanta [C/mol],
$t_i$	transportné číslo chloridových iontov [-],
$\gamma_i$	koeficient aktivity chloridových iontov [-],
$C_i$	koncentrácia chloridových iontov [mol/m <sup>3</sup> ],
$\rho_{BR}$	objemová elektrická resistivita [Ωm].

Molárna koncentrácia chloridových iontov  $C_i$  pre vodný roztok sa určí nasledovne:

$$C_i = \frac{m}{n} 1000 \quad /3.2/$$

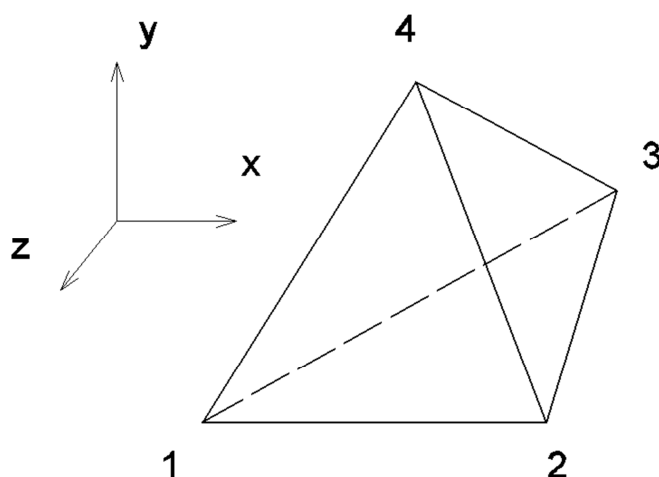
Kde sú:

$C_i$	molárna koncentrácia chloridových iontov [mol/m <sup>3</sup> ],
$m$	hmotnosť chloridov v 100 ml vodného roztoku [m];
$n$	molárna konštanta [mol].

Pri dosiahnutí difúzneho koeficientu počas starnutia betónu sa môže odvodiť faktor starnutia  $m$ , ktorý opisuje schopnosť betónu zlepšiť odolnosť pred prienikom chloridov. Parameter  $m$  sa vypočíta pomocou krivky nameraných difúzných koeficientov ku rovnici /6.2/. Hodnoty m-faktora sú pre betón HPC  $m = 0,2777$  a pre betón OPC  $m = 0,2884$

## 4. Voľba konečného prvku

Prvá časť diplomovej práce sa zameriava na úpravu stávajúceho algoritmu z bakalárskej práce [1] kde bol ako konečný prvok využívaný trojuholníkový prvok, ktorý mal výhodu v pomerne jednoduchom odvodení a príprave algoritmu. Čo sa týka požiadavku na rozšírenie algoritmu do 3D modelu kvôli spresneniu výsledkov bol navrhnutý na zhodnotenie konečný prvok pre riešenie 3D úloh ktorý je znázornený na obrázku 4.1.



Obrázok 4.1 Konečný prvok pre riešenie 3D úloh

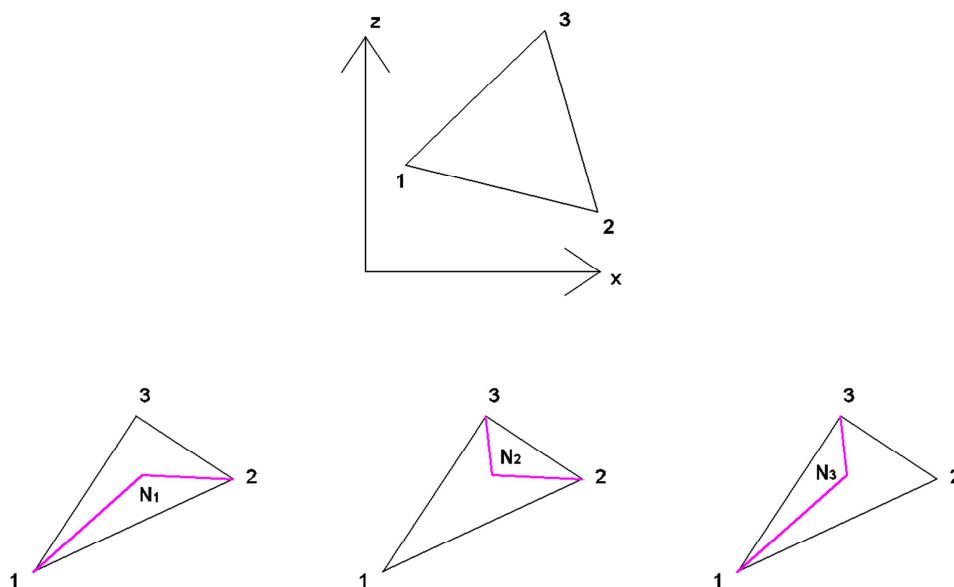
### 4.1 Popis trojuholníkového prvku

Keďže v rámci tejto diplomovej práce bol model posudzovaný aj v 2D je potreba popísať konečný prvok ktorý bol pri výpočte využitý. Celá táto podkapitola vychádza z informácií ktoré sú podrobne popísane v bakalárskej práci [1]. Prvok bol odvodený v rámci teplotne-difúznej analógie, ale v tejto práci je uvedený postup aplikovaný priamo na difúzni problém.

Prvým krokom pre odvodenie trojuholníkového izoparametrického prvku na difúznej úlohe je určenie báзовých interpolačných funkcií  $N$ . Tie vychádzajú z takzvaných plošných súradníc a využívajú pomer medzi celkovou plochou prvku  $a$  a plochou jednej tretiny prvku  $a_i$ :

$$N_1 = \frac{a_1}{a}, N_2 = \frac{a_2}{a}, N_3 = \frac{a_3}{a}. \quad /4.1/$$

Na obrázku 4.2 je znázornený trojuholníkový prvok a jeho grafické vyjadrenie plošných súradníc  $N_i$ .



Obrázok 4.2 Trojuholníkový izoparametrický prvok a jeho bázové funkcie

Vzťahy medzi k artézskou sústavou a plošnými súradnicami vyzerajú nasledovne

$$x = N_1 x_1 + N_2 x_2 + N_3 x_3 \quad /4.2/$$

$$z = N_1 z_1 + N_2 z_2 + N_3 z_3 \quad /4.3/$$

Inverziou rovníc /4.2/ a /4.3/ získame maticový zápis plošných súradníc.

$$\begin{Bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2a} \begin{bmatrix} x_2 z_3 - x_3 z_2 & z_2 - z_3 & x_3 - x_2 \\ x_3 z_1 - x_1 z_3 & z_3 - z_1 & x_1 - x_3 \\ x_1 z_2 - x_2 z_1 & z_1 - z_2 & x_2 - x_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{Bmatrix} \quad /4.4/$$

Plocha prvku vystupuje v rovnici /4.4/ pod označením  $a$ . Bolo vyžadujúce vyjadriť koncentrácie chloritových iónov  $C$  skrze aproximačné funkcie.

$$C = N_1 C_1 + N_2 C_2 + N_3 C_3, \quad /4.5/$$

Kde  $N_i$  sú funkcie popísané vo vzorcoch /4.1/ a  $C_i$  sú hľadané koncentrácie v jednotlivých uzloch. Výraz môžeme vyjadriť v maticovom tvare :

$$\{C\} = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{Bmatrix} \quad /4.6/$$

Ďalej je potreba odvodiť gradienty básových funkcií  $B$ , ktoré po prvku konštantné. Ich maticový zápis vypadá nasledovne :

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} \end{bmatrix} = \frac{1}{2a} \begin{bmatrix} Z_{23} & Z_{31} & Z_{12} \\ X_{32} & X_{13} & X_{21} \end{bmatrix} \quad /4.7/$$

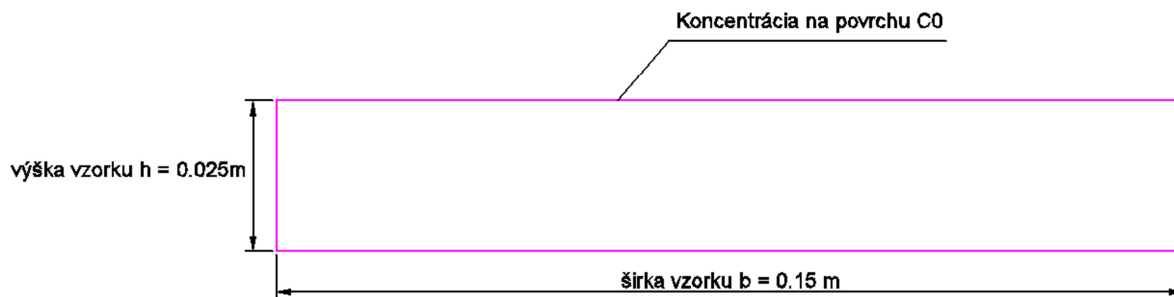
Finálnou fázou odvodu konečného prvku je matica vodivosti označená písmenom  $K$ , keďže je v klasických úlohách teórie pružnosti analogická k matici tuhosti. Tiež je treba odvodiť maticu kapacity  $C$ . Obe matice boli odvodené pre pravouhlý trojuholníkový prvok v práci *Numerické řešení 2D difúze chloridů pomocí MKP* [1].

$$K = \int_V B^T D_c B dV = AB^T D_c B, \quad /4.8/$$

$$C = \int_V N^T N dV = AN^T N. \quad /4.9/$$

## 4.2 Príklad

Aj keď bolo cieľom diplomovej práce postupne vyvíjať 2D model do 3D modelu a overiť tak vplyv odberu chloridového profilu na ďalšie prenikanie chloridov v bezprostrednom okolí odberu, bolo nutné rozvinúť už stávajúci algoritmus a skontrolovať jeho funkčnosť a presnosť. Pre túto úlohu boli zvolené dva betónové vzorky s materiálom OPC (klasický betón) a HPC (vysokopevnostný betón). Tieto betóny sa predovšetkým líšia difúznym súčiniteľom  $D_c$ . Keďže prvky boli vystavené koncentráciám chloridov s každej strany je potreba rozšíriť algoritmus pre tento prípad. Rez prvkov pre účel 2D modelu je znázornený na obrázku 4.3.



Obrázok 4.3 Schéma betónové vzorku

Presnosť výpočtu sme skontrolovali komerčným programom Ansys [4] a vytvoreného výpočtového programu v prostredí Matlab [5]. Vstupné dáta pre oba betóny sú popísané v tabuľkách 4.1 a 4.2.

Tabuľka 4.1 Vstupné hodnoty pre betón OPC (klasický betón)

Parameter	Hodnota
Hrúbka vzorku $h$	0,025m
Šírka vzorku $b$	0,15m
Difúzny súčiniteľ $D_c$	$8,79 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$
Materiálová konštanta $m$	0,2884
Koncentrácia na povrchu $C_0$	1,4 %
Počet prvkov na hrúbku	10
Počet prvkov šírku	60
Súradnice hľadaného bodu $[x;z]$	[0,075;0,0125]

Tabuľka 4.2 Vstupné hodnoty pre betón HPC (klasický betón)

Parameter	Hodnota
Hrúbka vzorku $h$	0,025m
Šírka vzorku $b$	0,15m
Difúzny súčiniteľ $D_c$	$2,54 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$
Materiálová konštanta $m$	0,2777
Koncentrácia na povrchu $C_0$	1,4 %
Počet prvkov na hrúbku	10

Počet prvkov šírku	60
Súradnice hľadaného bodu [x;z]	[0,075;0,0125]

### 4.3 Povrchová koncentrácia

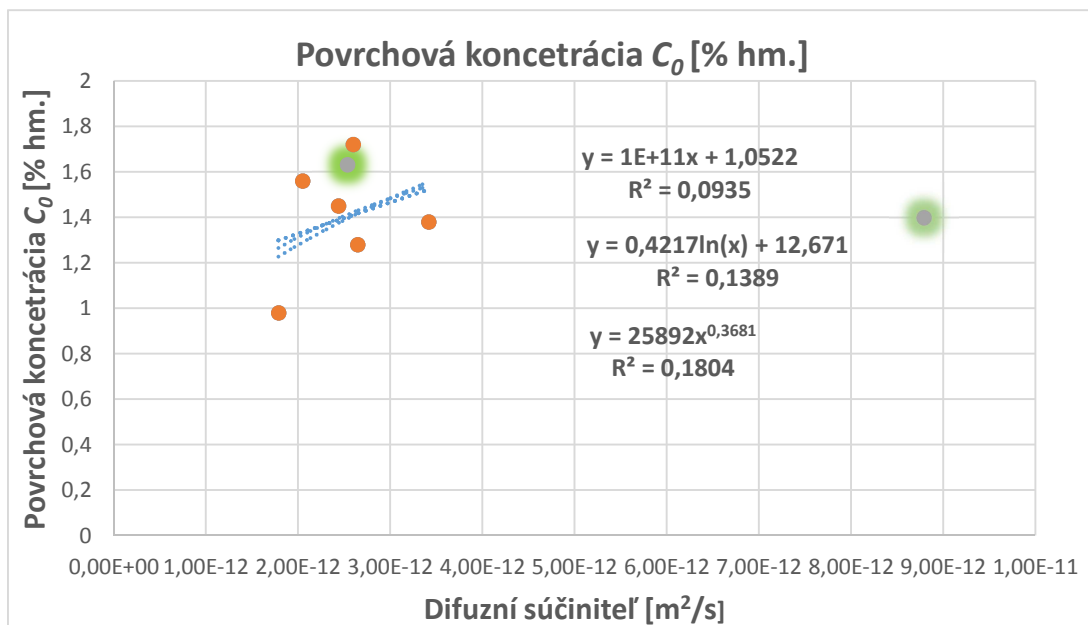
V našom prípade môžeme hodnotu povrchovej koncentrácie iba odhadnúť, avšak vďaka tabuľke 1 str. 39 z práce pána doc. Konečného *Vyhodnocení trvanlivosti železobetonových mostovok s ohledem na vliv chloridů a na rozptyl vstupních parametrů* [2], je možné odhad priblížiť skutočnej hodnote.

*Tabuľka 4.3 Povrchová koncentrácia chloridov a difúzny súčiniteľ po 28 dňoch a jadrových vývrtov FV*

Expozícia	Povrchová koncentrácia $C_0$ [%hm.]	Difúzny súčiniteľ $D_{C28}$ [m <sup>2</sup> /s]
FV1	1,38	3,42E-12
FV2	1,28	2,65E-12
FV3	0,98	1,79E-12
FV6	1,45	2,44E-12
FV7	1,72	2,60E-12
FV8	1,56	2,05E-12

Keďže bol známy u našich materiáloch iba difúzny súčiniteľ po 28 dňoch  $D_{C28}$ , bolo možné pomocou lineárnej regresie dopočítať povrchovú koncentráciu  $C_0$ . Na obrázku 4.4 je graf kde sú znázornené zelenou farbou hodnoty ktoré hľadáme, oranžové bodky predstavujú údaje získane s laboratórnych meraní. Tiež je vďaka možnosti trendovej spojnice, ktoré sú označené modrými bodkovanými čiarami, odvodiť hodnoty pre lineárnu, logaritmickú a mocninovú spojnicu. V grafe sú rovnice ktoré predstavujú numerický výpočet trendových spojnic.





Obrázok 4.4 Výpočet povrchovej koncentrácie pomocou lineárnej regresie

Odvođené rovnice boli použité na výpočet povrchovej koncentrácie a ich aritmetický priemer bola naša hodnota povrchovej koncentrácie.

Tabuľka 4.4 Výpočet povrchovej koncentrácia  $C_0$ 

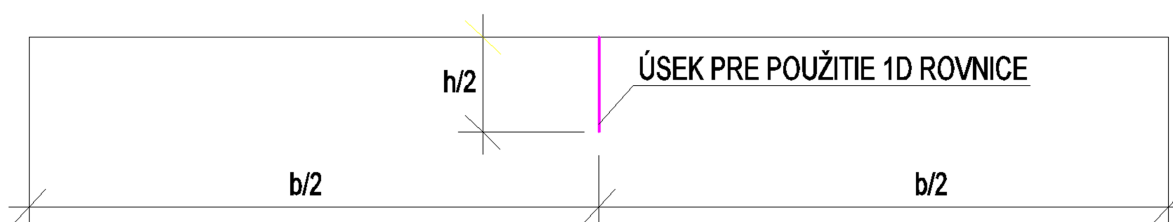
Lineárna		
OPC	8,79E-12	1,9312
HPC	2,54E-12	1,3062
Logaritmická		
OPC	8,79E-12	1,9356
HPC	2,54E-12	1,4121
Mocninová		
OPC	8,79E-12	2,2052
HPC	2,54E-12	1,3963
		Priemer zdrojových dát
	OPC	2,02
	HPC	1,37

## 5. Porovnanie výsledkov

V tejto kapitole sú uvedené 3 príklady, na ktorých kontrolujeme funkčnosť algoritmu. Porovnávame ho s 1D rovnicou difúzie, s programom ANSYS Mechanical APDL, kde modelujeme 2D úlohu a s modelom s programu ANSYS WORKBENCH kde vytvárame 3D model.

### 5.1 Porovnanie s 1D rovnicou difúzie

V tejto kapitole bolo čerpané zo znalosti, ktoré boli riešené v práci pána Ing. Lehnery [1]. Tento 1D model názorne ukáže prenikanie chloridov do betónovej vzorky v prípade že nemáme časovo závislý difúzny koeficient ktorý bude popísaný v ďalšej kapitole. Jeho hodnoty môžeme porovnať s našim 2D výpočtom v prípade že budeme hodnoty merať v strede vzorky, od jeho povrchu po jeho stred obr.5.1, čím zamedzíme vzniku možného skreslenia výsledkov.



Obrázok 5.1 Označenie meranie 1D rovnice difúzie

Ku kontrole použijeme upravené Crankovo riešenie[7] diferenciálnej rovnice druhého Fickova zákona:

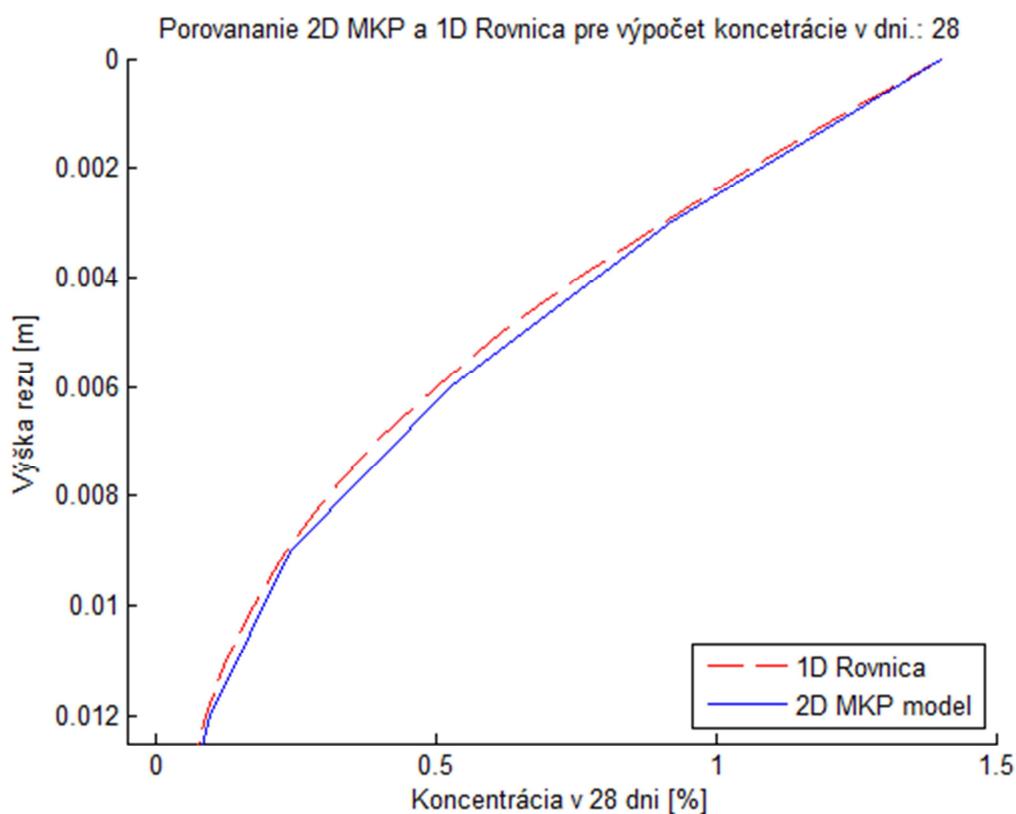
$$C_{x,t} = C_0 \left\{ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{14} \frac{(-1)^n \left( \frac{x}{\sqrt{4D_c t}} \right)^{2n+1}}{n! (2n+1)} \right\} \quad /5.1/$$

Pričom  $C_{x,t}$  predstavuje koncentrácia chloridových iontov [%] v čase  $t$  [s] a hĺbke  $x$  [m].  $C_0$  [%g označuje koncentráciu chloridov na povrchu, čiže sa jedná o zaťaženie na prvok a hodnota  $D_c$  je charakteristická materiálová konštanta predstavujúca súčiniteľ difúzie, ktorý udáva prestup chloridov cez 1 m<sup>2</sup> betónu za rok pôsobenia.

Tabuľka 5.1 Vstupné hodnoty príkladu

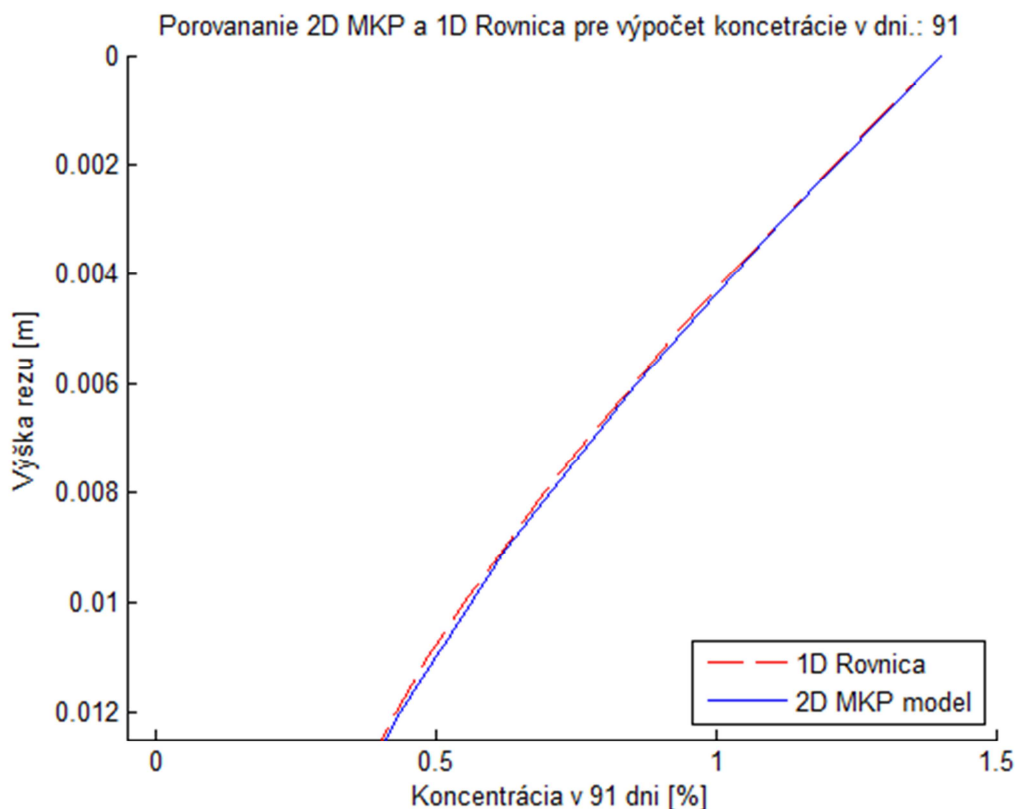
Parameter	Hodnota [jednotka]
Difúzny súčiniteľ $D_c$	OPC = $8,79 \cdot 10^{-12}$ [m <sup>2</sup> /s]
Hĺbka hľadanej koncentrácie $x$	0,0125 [m]
Hrúbka vzorku $h$	0,025 [m]
Koncentrácia na povrchu $C_0$	1,4 [%]
Čas merania $t$	$t = 28$ dni, $t = 91$ dni

Rovnica /5.1/ bola vložená do algoritmu a hodnoty z oboch výpočtov sme vykreslili do jedného grafu pre lepšie porovnanie výsledkov.



Obrázok 5.2 Porovnanie 2D MKP a 1D rovnica difúzie v čase 28 dní

U prvého grafu obr./5.2/ je zadaný čas merania 28 dní. Na obrázku je vidieť že výsledky sa len veľmi mierne líšia, predpokladáme že z dôvodu menšieho počtu dát pre vykreslenie koncentrácie po výške. U druhého grafu obr. /5.3/ už je rozdiel výsledkov prakticky nulový.



Obrázok 5.3 Porovnanie 2D MKP a 1D rovnica difúzie v čase 91 dní

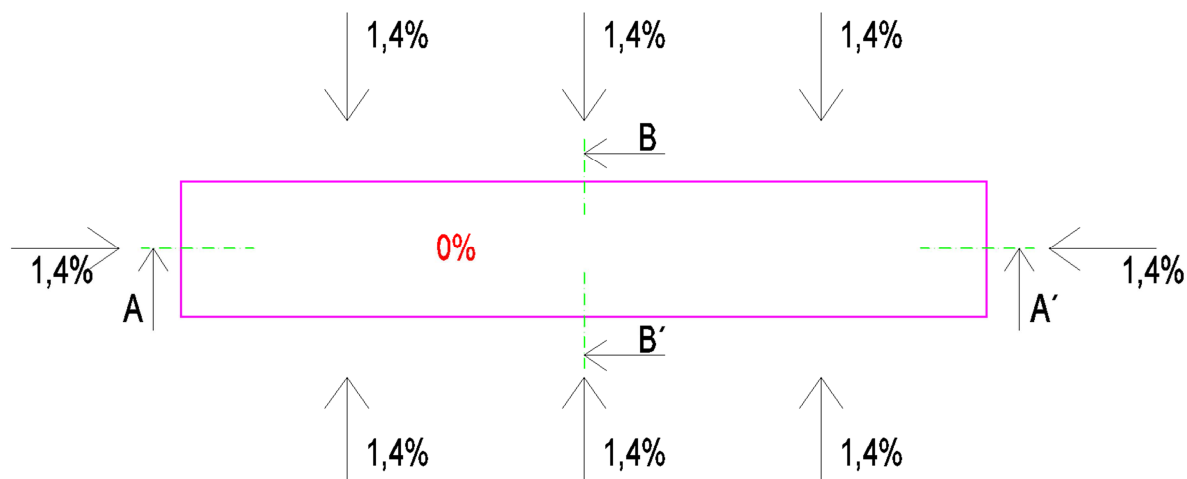
Výsledky sú pri oboch grafoch sú známkou toho že model pre výpočet 2D zaťaženia pracuje presne. Toto meranie bol prvý krok pri kontrole algoritmu.

## 5.2 Program ANSYS Mechanical APDL v porovnaní s 2D úlohou

Táto podkapitola je zameraná na kontrolu výpočtu s komerčným programom ANSYS Mechanical APDL, kde budeme modelovať 2D úlohu. Rozpíšeme si zaťaženie, konečné prvky, vstupné hodnoty, proces výpočtu a porovnáme výsledky graficky aj numericky.

### 5.2.1 Zaťaženie

Úloha je modelovaná ako teplotná analýza, avšak s tým rozdielom že merná tepelná kapacita  $c$  a hustota materiálu  $\rho$  sa budú rovnať jedna a tepelná vodivosť bude difúzny koeficient.

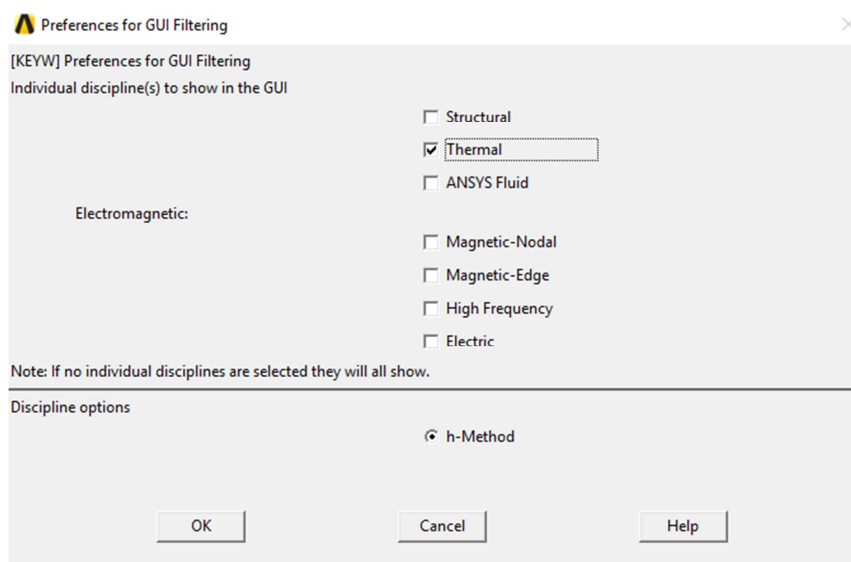


Obrázok 5.4 Zaťaženie vzorku

Hodnota teploty na povrchu bude rovná koncentrácií chloridov na povrchu v percentách a teplota vnútri bude v našom prípade nula čo predstavuje možnosť že betón už je z časti nasýtení. V našom prípade predpokladáme nulovú nasýtenosť vo vzorku.

### 5.2.2 Tvorba modelu

Na začiatku modelovania je potrebné zadať akú úlohu budeme modelovať. Našu úlohu modelujeme ako teplotnú analýzu (thermal solution).



Obrázok 5.5 Voľba typu úlohy v akej vytvárame model [11]

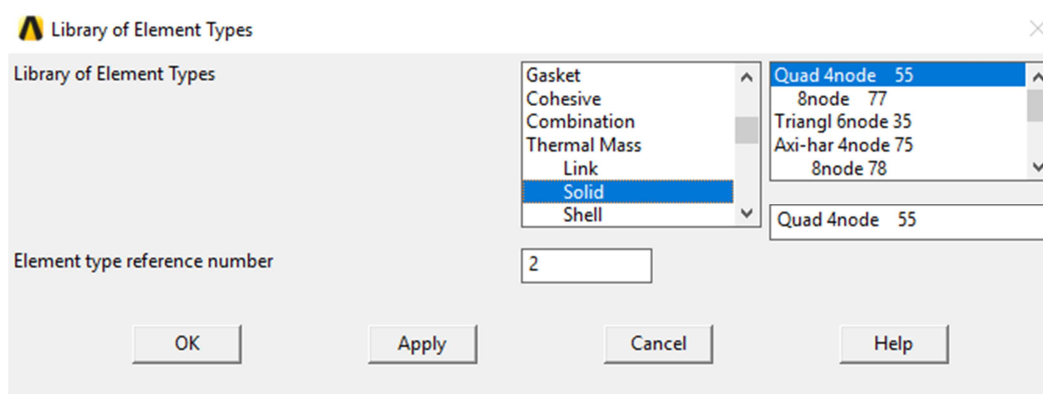
Keďže Ansys pracuje na princípe metódy konečných prvkov je potreba vhodne zvoliť konečný prvok. Program obsahuje až 40 konečných prvkov ktoré sa dajú použiť pre teplotnú

analýzu v ustálenom stave ako aj v prechodnom termickom stave. Všetky konečné prvky sú popísané v práci manuálu na teplotnú analýzu [11].

Postup vykonávania tepelnej analýzy zahŕňa tri hlavné úlohy :

- Tvorba modelu
- Zaťaženie modelu
- Kontrola výsledkov

Postup určenie typu prvku : **Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete**

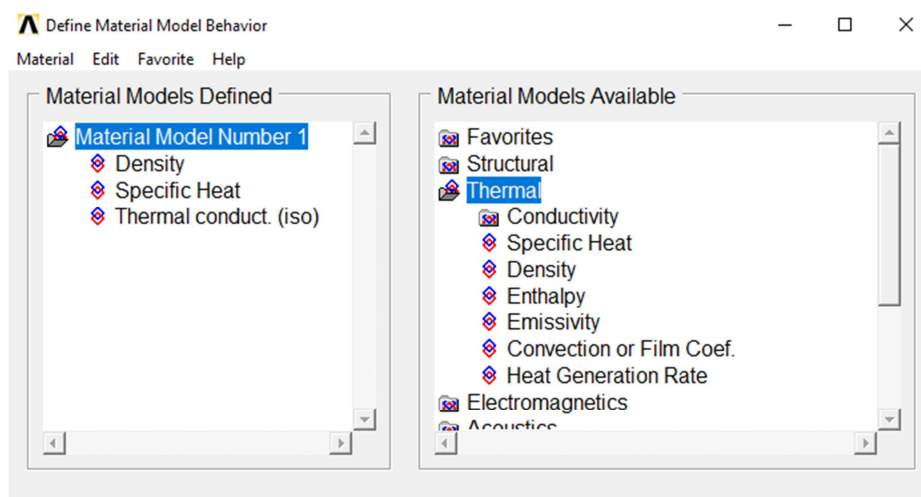


Obrázok 5.6 Voľba konečného prvku (PLANE55) [11]

V našom prípade sme zvolili typ PLANE55 (Štvoruzlový) ktorý je vhodný pre 2D úlohu.

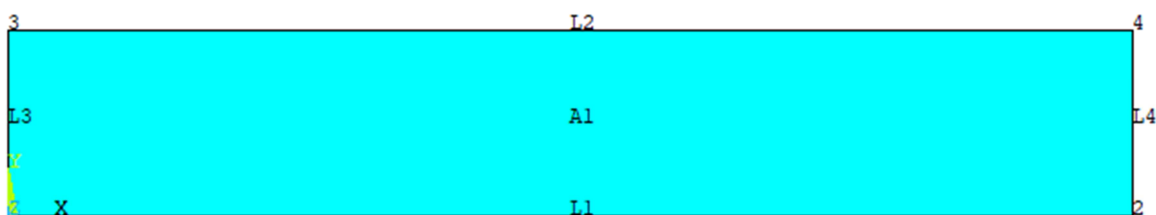
Postup definovania konštantných vlastností materiálu: **Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Models> Thermal**

Vlastnosti materiálu môžu byť zadávané ako numerické hodnoty alebo ako tabuľkové vstupy pre niektoré prvky. Hustota materiálu (Density) a Tepelná kapacita (Specific Heat) sú rovne 1 a tepelná vodivosť ( Thermal conductivity) sá rovná difúznemu súčiniteľu  $D_c$ .



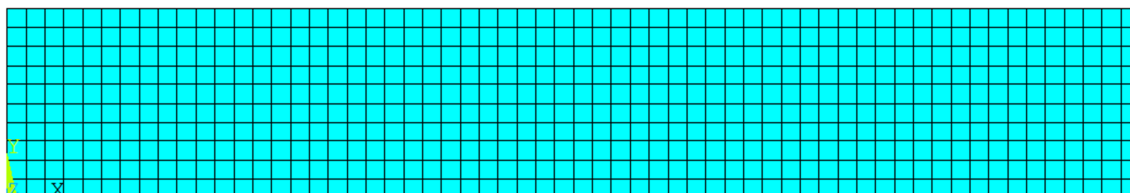
Obrázok 5.7 Definícia materiálových charakteristík [11]

Rozmery modelov sú založené na globálnom súradnicovom systéme. Štandardne je použitý karteziánsky globálny súradnicový systém s osami X, Y a Z. Prvým krokom pri vytváraní geometrie je vytvorenie pevného modelu ktorý analyzujeme. My manuálne definujeme uzly (key), okraje prvku (lines) a nakoniec plochy (areas).



Obrázok 5.8 Vykreslenie modelu a jeho častí [11]

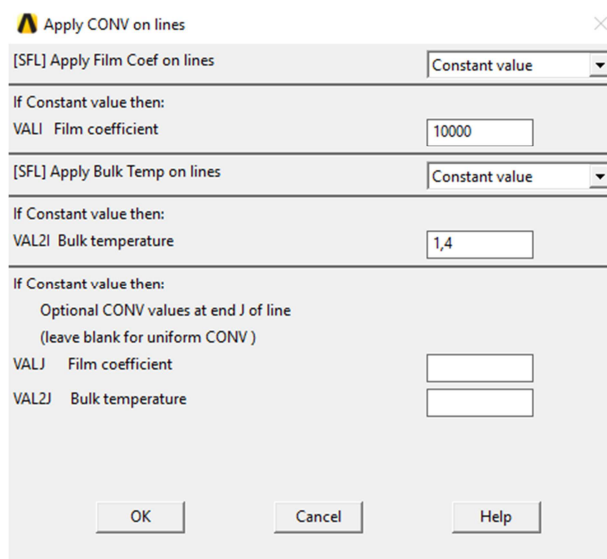
Po tvorbe geometrie je ju potreba rozdeliť na konečné prvky takzvaným „meshovaním“. Je vhodné si určiť veľkosť konečného prvku rovnaký ako bol použitý pri výpočte v Matlabe, teda 0,0025 m . Postup rozdelenia na konečné prvky: **Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh Attributes> Picked Areas.**



Obrázok 5.9 Rozdelenie modelu na konečné prvky [11]

Zaťaženie na tento model bude pôsobiť s každej strany. Postup pri zadávaní zaťaženia: **Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> Thermal> Convection> On**

**Lines.** V tomto prípade je najjednoduchšie ručne pomocou myši zakliknúť všetky hrany, určite filmový koeficient a povrchovú teplotu (koncentrácia chloridov na povrchu).



Obrázok 5.10 Zataženie vzorku [11]

Keďže ANSYS počíta až do doby, kedy je celý prvok úplne nasýtený na hodnotu 1,4% a až potom ukončí výpočet je potreba regulovať zaťaženie na určité dni, aby bolo jasné akou rýchlosťou postupuje chloridové nasýtenie. Na vyriešenie tohto problému vytvoril pán doc. Konečný poznámkový dokument, takzvaný Macro, obr. 5.11 ktorý počíta do doby 91 dní od začiatku pôsobenia chloridových iontov, a až v tej chvíľu ukončí výpočet.

```

nestac.mac - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení nápověda
! Delka casoveho kroku [sec]
TIME_INC=60
! Doba simulace (Pocet dnu * delka dne) [sec]
t = 91*86400
! Pocet vysledku (Pocet dnu * pocet hodin)
n_time_res = 91*24 + 1

! Priprava tabulky casu
*dim,time_tab,array,(n_time_res) ! Time row

*DO,i_t,1,(n_time_res)
time_tab(i_t)=t/(n_time_res)*(i_t-1)
*ENDDO

! Nastaveni pocatecniho casu
*SET,TIME_TAB(1,1,1) , TIME_INC +1

/PREP7
! Pocatecni teplota konstrukce
TUNIF,0
FINISH

/SOLU
! Casove zavisla analiza
ANTYPE,4
    
```

Obrázok 5.11 Časť príkazov s macra (textový súbor) [15]

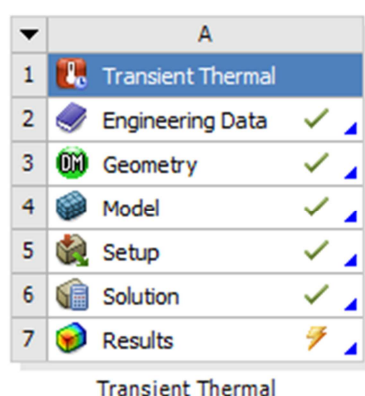


### 5.3 Program ANSYS Workbench v porovnaní s 2D úlohou

V tejto podkapitole budeme modelovať vzorku v prostredí Ansys Workbench ktorý je softwarová nadstavba pre program ANSYS. Slúži na jednoduchšie a rýchlejšie modelovanie statický, dynamických a teplotných úloh.

#### 5.3.1 Tvorba modelu

Na začiatku je potreba zvoliť typ úlohy v akej budeme daný model vytvárať, vďaka čomu Ansys Workbench automaticky zvolí najvhodnejší konečný prvok. V našom prípade sa jedná o prechodne tepelnú analýzu (Transient Thermal).



Obrázok 5.12 Typ úlohy v ktorej vytvárame model [16]

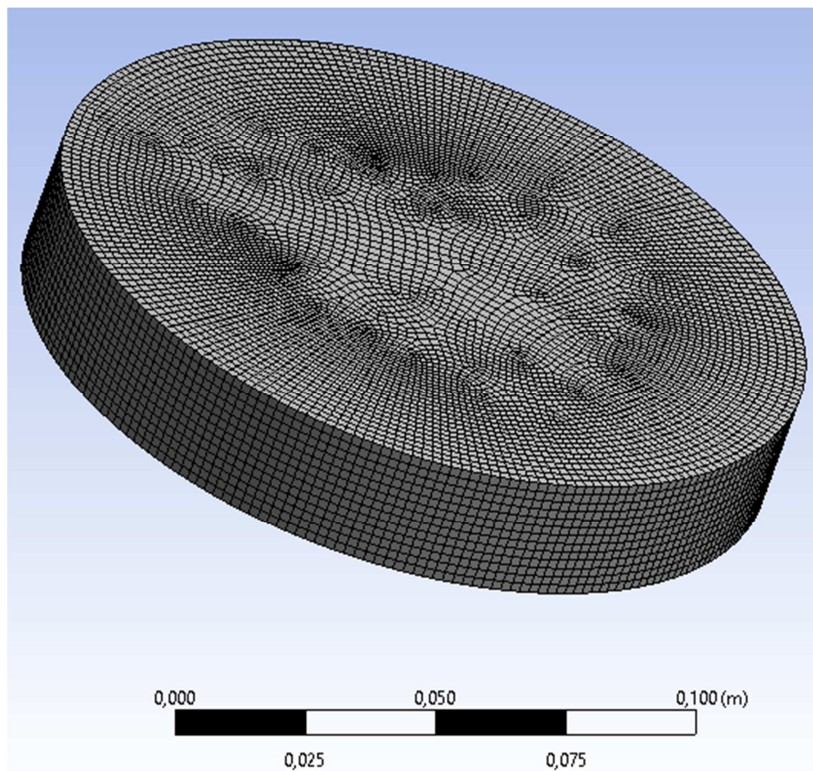
Ďalej je potreba v sekcii Engineering Data nadefinovať materiál a jeho vstupné údaje. Použijeme rovnaké údaje ako v predošlom príklade ktoré sú uvedené v tabuľkách 4.1 a 4.2.

Properties of Outline Row 3: Concrete			
	A	B	
1	Property	Value	
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1	kg m <sup>-3</sup>
4	Isotropic Thermal Conductivity	8,79E-12	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
5	Specific Heat, C <sub>p</sub>	1	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>

Obrázok 5.13 Zadefinovanie materiálových charakteristík [16]

Po tomto bode bolo možné začať modelovať geometriu na ktorej bolo posudzované prenikanie chloridových iónov v priestore. Nástroje ktoré sú preddefinované v programe nám tvorbu geometrie výrazne urýchlia oproti modelovaniu v program Ansys Mechanical APDL. Po zadefinovaní geometrie je potreba rozdeliť model na konečné prvky, na čo použijeme

znova „meshovanie“. Veľkosť konečného prvku bol určený obdobne ako v predošlej úlohe pre lepšie porovnanie výsledkov.



Obrázok 5.14 Geometria a rozdelenie modelu na konečné prvky [16]

Ďalej je potreba definovať zaťaženie a počiatočnú vnútornú nasýtenosť chloridovými iontami ktorá sa rovná nule, z dôvodu predpokladu že betón je neobsahuje pred meraním žiadne prvky chloridových v materiáli. Zaťaženie použijeme podobne ako v predošlom príklade, iba s tým rozdielom že zaťaženie už nepôsobí iba na okraje ale na celé plochy.

Details of "Initial Temperature"	
Definition	
Initial Temperature	Uniform Temperature
Initial Temperature Value	0, °C

Obrázok 5.15 Počiatočná nasýtenosť v materiáli [16]

Údaj ktorý je označený ako Film Coefficient, predstavuje hodnotu ako veľmi bude tenká vrstva na povrchu izolovať pred prenikaním chloridov do materiálu. Zjednodušene sa dá povedať že čím väčší Film Coefficient tým menej je zabránene prenikaniu chloridových iontov. Nechcem aby na povrchu pôsobil akýkoľvek odpor okrem odporu betónu voči chloridom preto je táto hodnota veľmi vysoké číslo v našom prípade  $10\,000\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ .

Details of "Convection"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Faces
[-] Definition	
Type	Convection
<input type="checkbox"/> Film Coefficient	1,e+005 W/m <sup>2</sup> .°C (step applied)
<input type="checkbox"/> Ambient Temperature	1,4 °C (step applied)
Convection Matrix	Program Controlled
Suppressed	No

Obrázok 5.16 Zaťaženie na model [16]

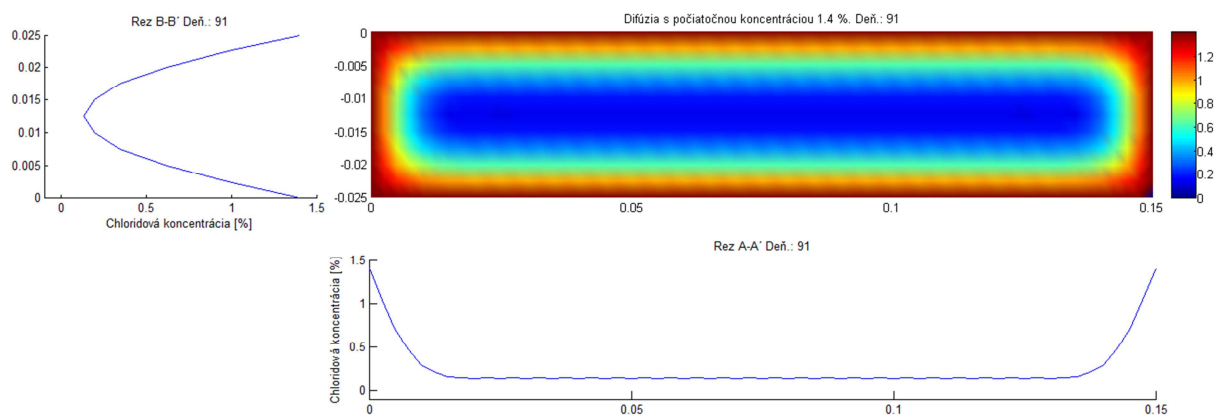
Pred začatím výpočtu je ešte nutné definovať časy v sekundách v ktorých budeme porovnávať výsledky a sú to dni 7,14,28,56,91 rozložené na sekundy.



Obrázok 5.17 Definícia času [s] do kedy prebieha výpočet [16]

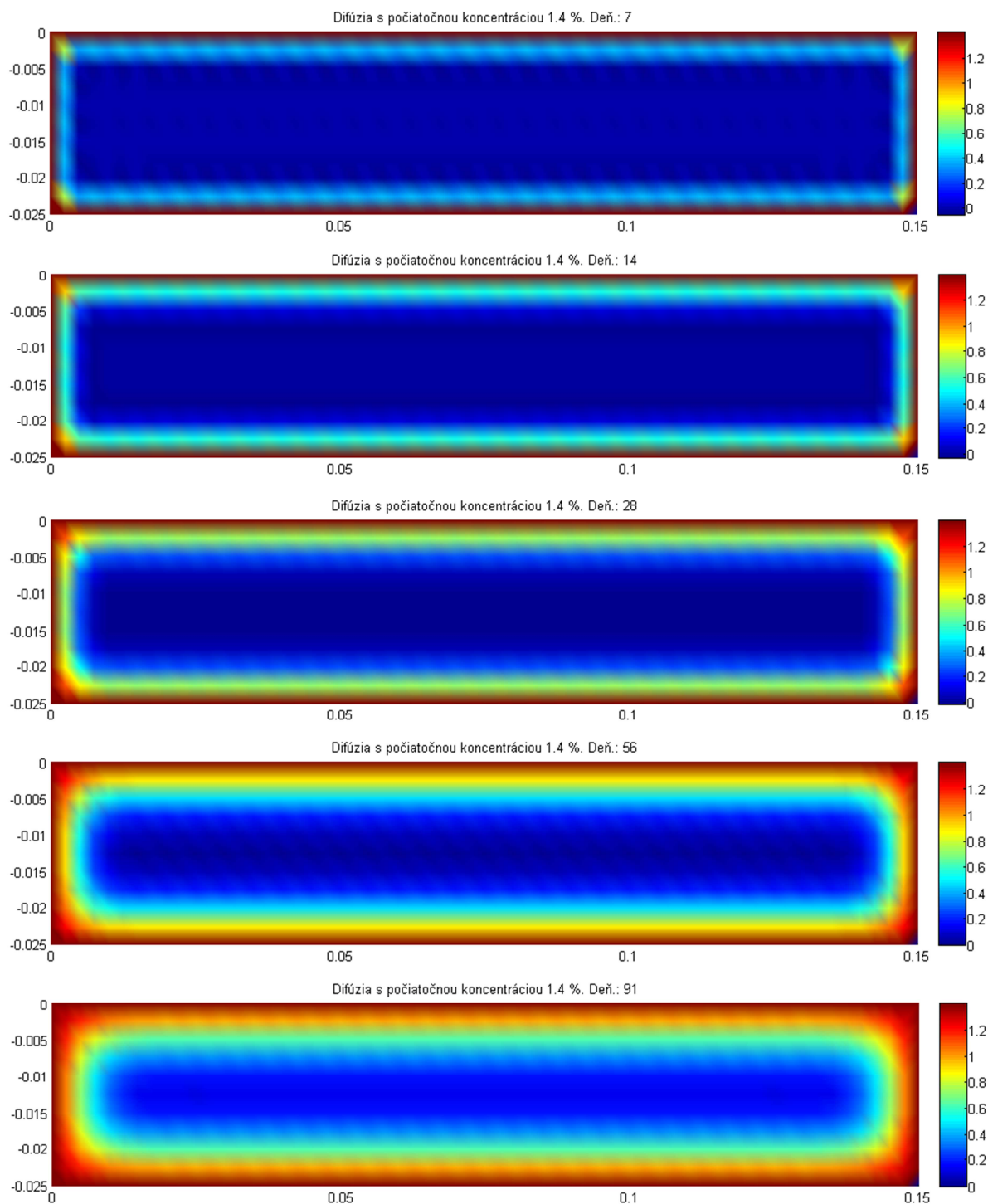
## 5.4 Výsledky

Hodnoty nasýtenia sme porovnávali s výstupmi s Matlabu, Ansysu Mechanical APDL a v Ansysu Workbench. Výstupmi zo všetkých programov bol stupeň nasýtenia v 7, 14, 28, 56 a 91 dní.

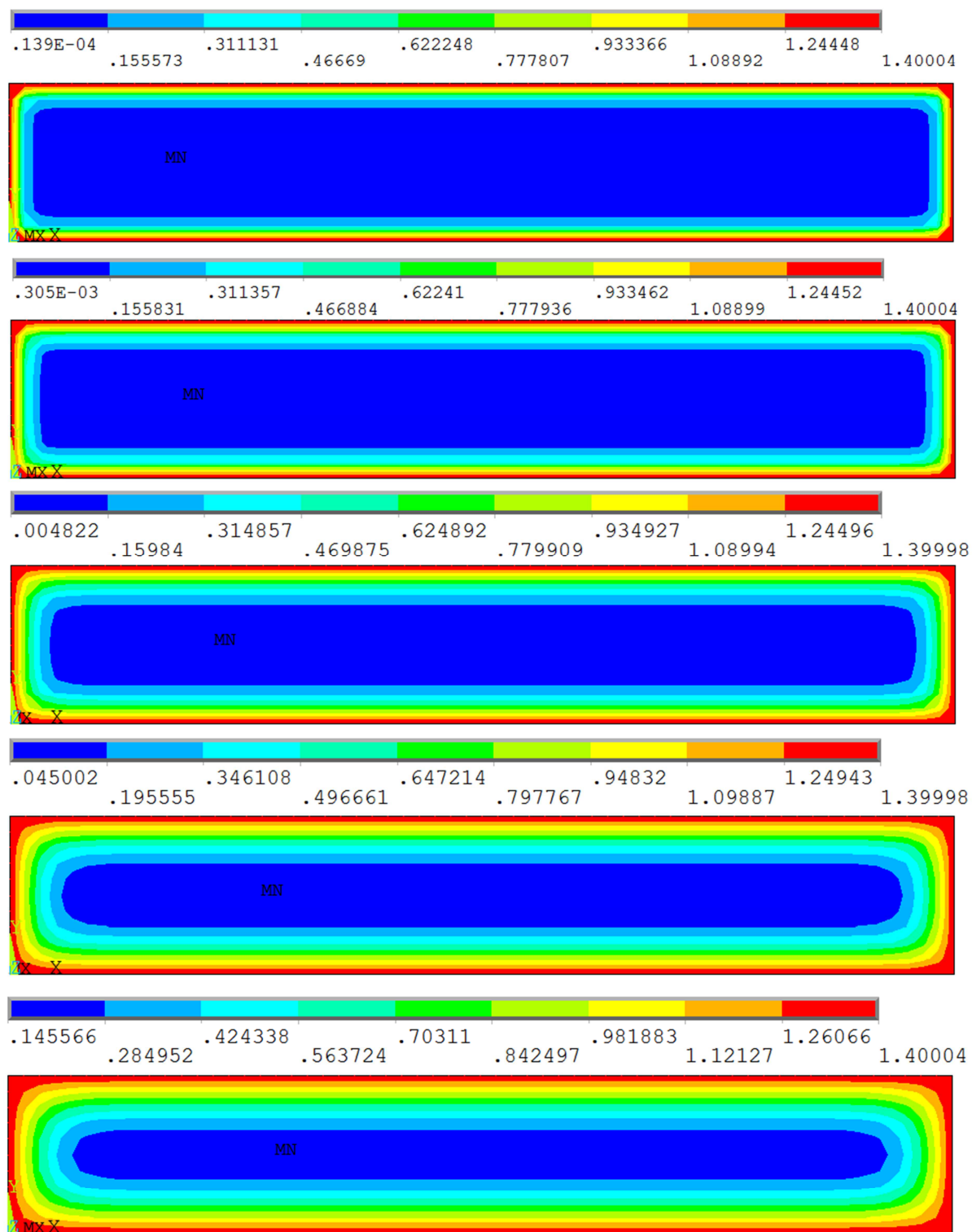


Obrázok 5.18 Grafický výstup s programu Matlab pre betón HPC v čase 91 dní

Na obrázkoch 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 a 5.23 môžeme vidieť ako postupuje chloridové ionty do vzorku. Najlepšie je možné vidieť prenikanie na obrázku 5.18 kde sú farebne znázornenie koncentrácie v jednotlivých dňoch

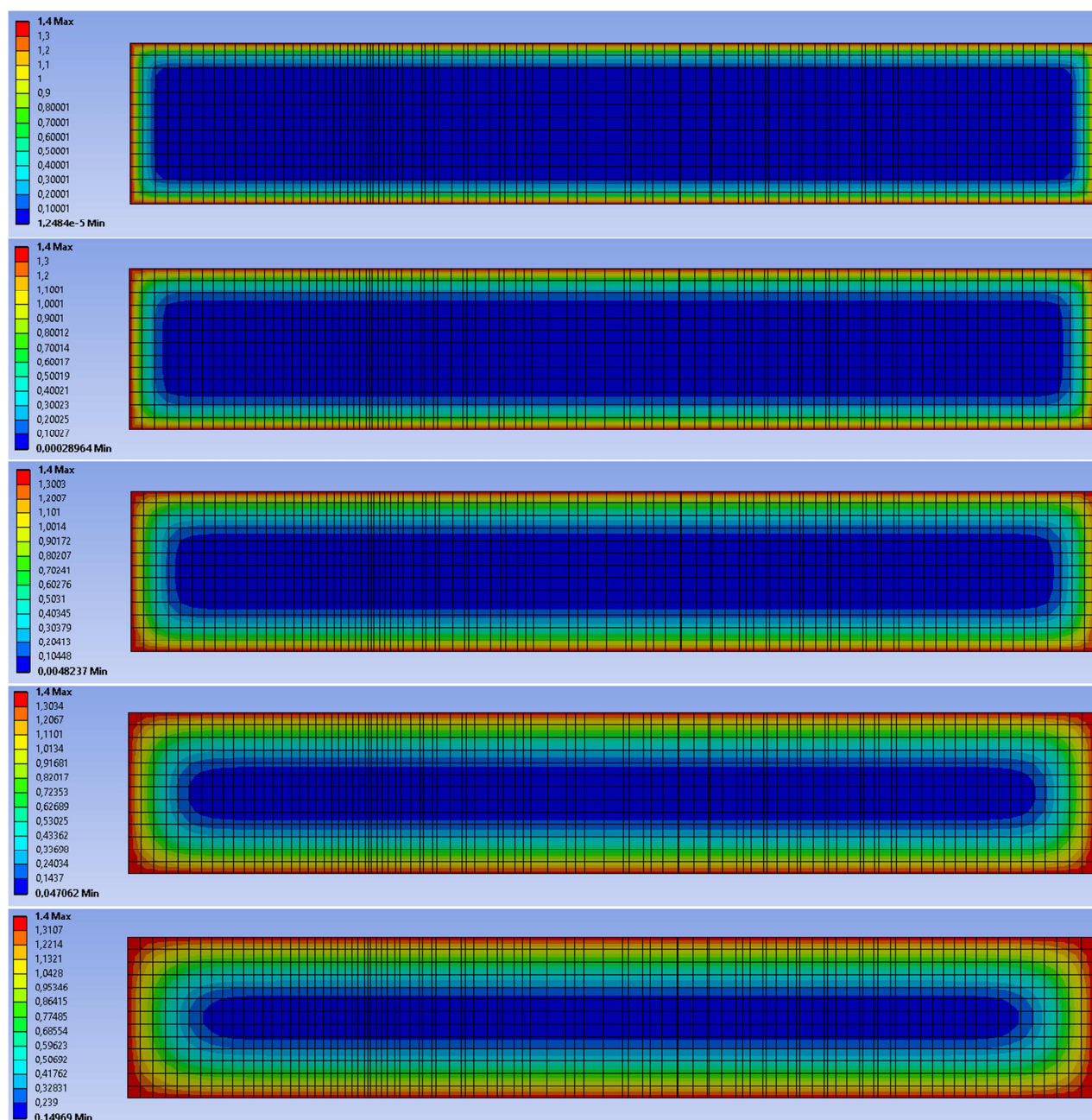


Obrázok 5.19 2D Grafický výstup s programu Matlab pre betón HPC



Obrázok 5.20 2D Grafický výstup s programu Ansys Mechanical APDL pre betón HPC



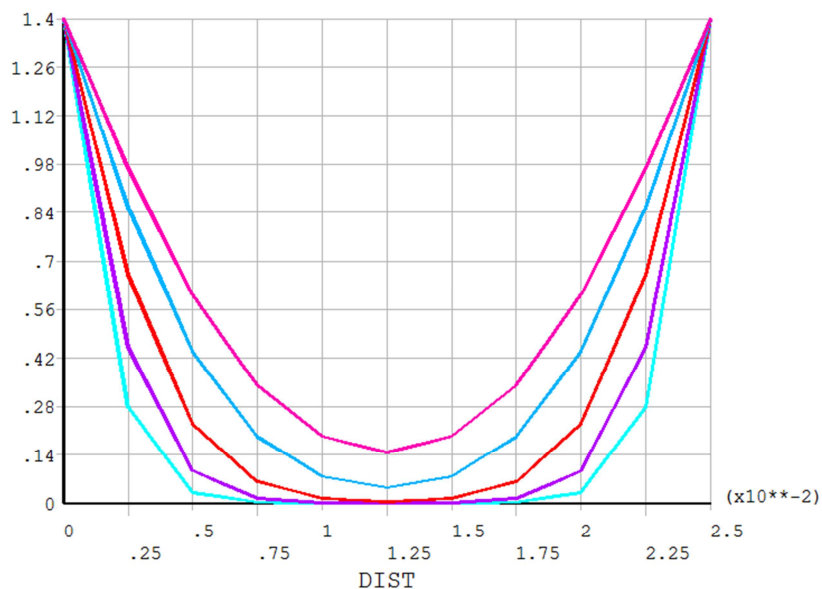


Obrázok 5.21 Grafický výstup s Ansys Workbench pre betón HPC

1  
POST1  
STEP=1  
SUB =808  
TIME=.785E+07  
PATH PLOT  
NOD1=102  
NOD2=32  
B\_B\_7  
B\_B\_14  
B\_B\_28  
B\_B\_56  
B\_B\_91

ANSYS  
R19.1  
Academic

OCT 24 2018  
15:01:17

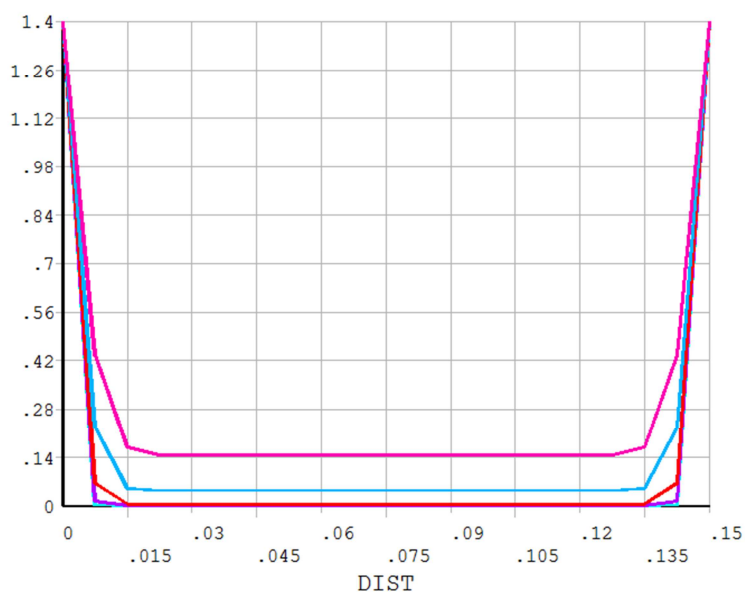


Obrázok 5.22 Rez B-B' s programu ANSYS Mechanical APDL, betón HPC

1  
POST1  
STEP=1  
SUB =808  
TIME=.785E+07  
PATH PLOT  
NOD1=136  
NOD2=67  
A\_A\_7  
A\_A\_14  
A\_A\_28  
A\_A\_56  
A\_A\_91

ANSYS  
R19.1  
Academic

OCT 24 2018  
15:06:21

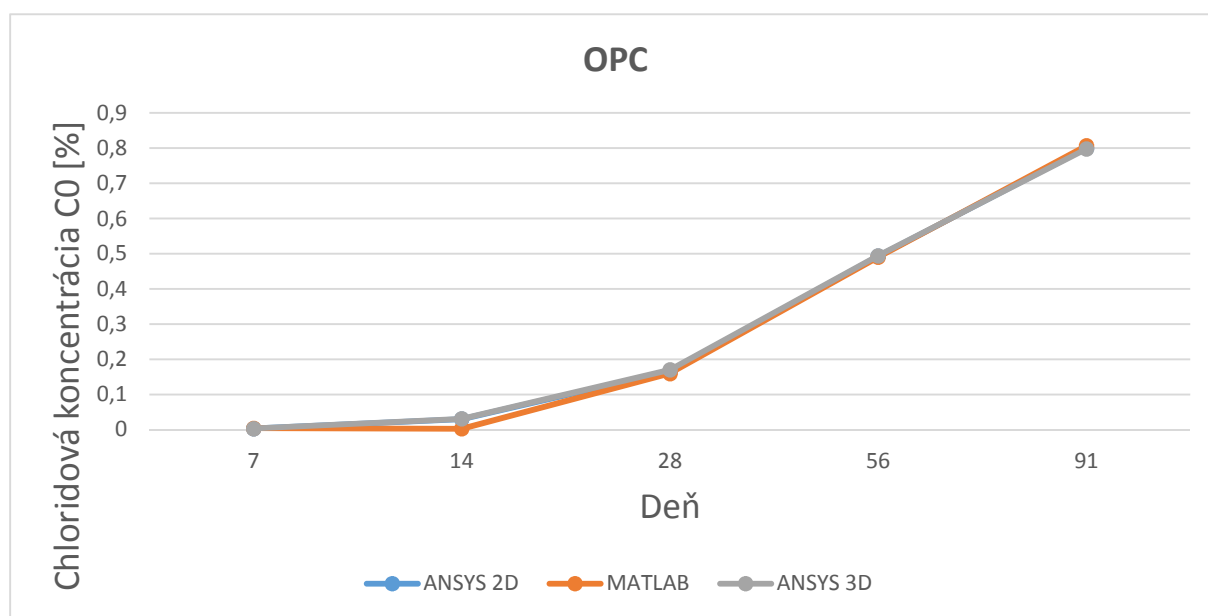


Obrázok 5.23 Rez A-A' s programu ANSYS Mechanical APDL, betón HPC

Nakoľko je výstupov veľa, keďže s každého programu sú hodnoty pre jednotlivé rezy a pre oba druhy betónov, hodnoty sme spísali do tabuliek 5.2 a 5.3 a graficky znázornili rozdiely v presnosti. Hodnoty bol merané zo stredu vzorku.

Tabuľka 5.2 Výsledne hodnoty chloridovej koncentrácie pre betón OPC [%]

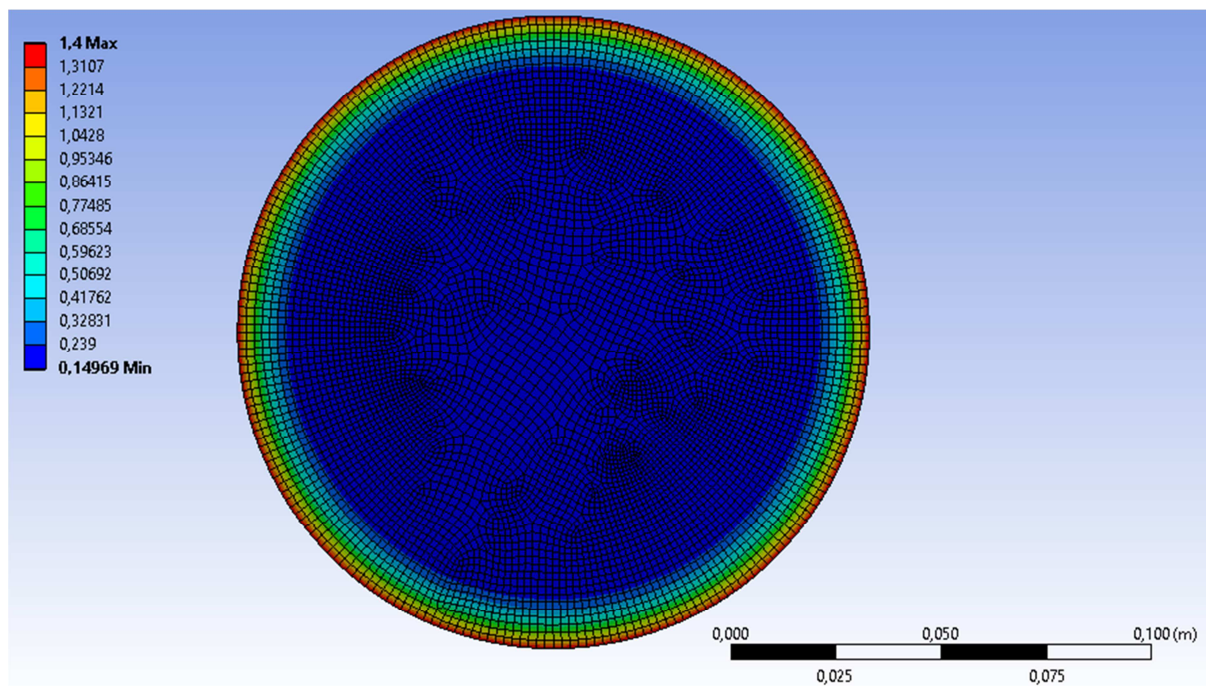
OPC						
Deň	ANSYS 2D	MATLAB	ANSYS 3D	ANSYS 2D/MATLAB	ANSYS 2D/ANSYS 3D	ANSYS 3D/MATLAB
7	0,003	0,004	0,0033	0,750	0,909	0,825
14	0,03	0,0027	0,031	11,111	0,968	11,481
28	0,166	0,1593	0,17	1,042	0,976	1,067
56	0,493	0,4901	0,494	1,006	0,998	1,008
91	0,8	0,8065	0,7974	0,992	1,003	0,989



Obrázok 5.24 Grafický znázornené výsledne hodnoty koncentrácií pre betón OPC

V tabuľke 5.2 a na obr. 5.24 môžeme vidieť že čím je čas  $t$  väčší tým sa znižuje nepresnosť merania. Bolo predpokladané že ANSYS pracuje ešte z ďalšími funkciami na pozadí výpočtu, na rozdiel od algoritmu v Matlabe. Avšak údaje sú dostatočne presne na to aby bolo možné s nimi ďalej pracovať, nakoľko koncentrácia chloridov v konštrukcii nás zaujíma po relatívne dlhšom čase.

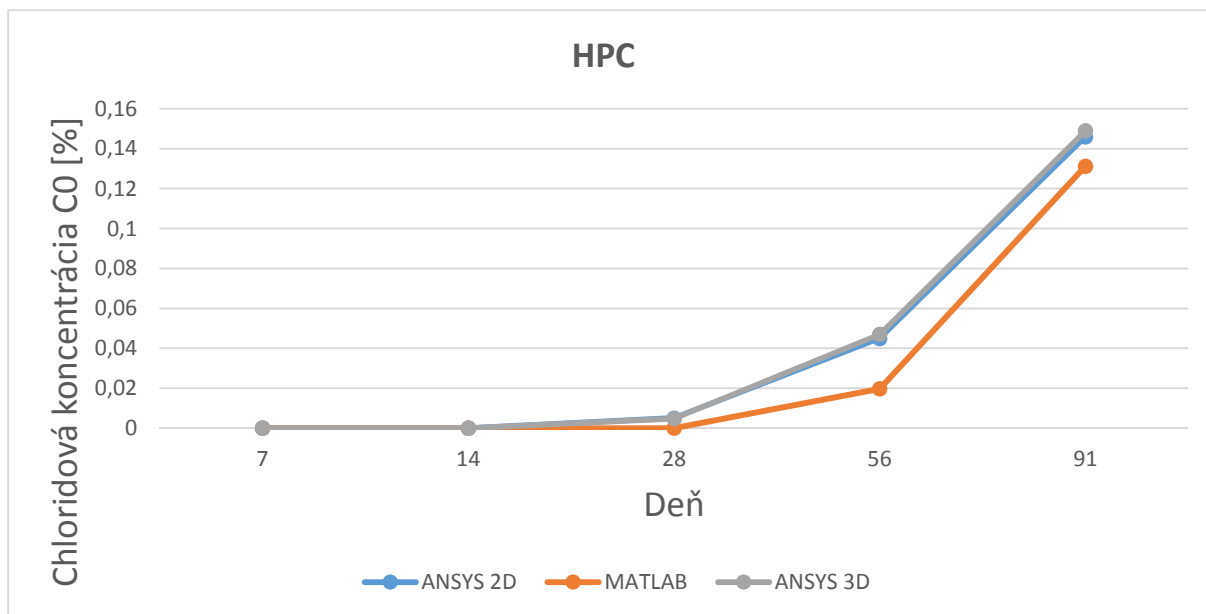




Obrázok 5.25 Výstup s programu Ansys Workbench, pozdĺžny rez, čas 91 dní

Tabuľka 5.3 Výsledne hodnoty chloridovej koncentrácie pre betón HPC [%]

HPC						
Deň	ANSYS 2D	MATLAB	ANSYS 3D	ANSYS 2D/MATLAB	ANSYS 2D/ANSYS 3D	ANSYS 3D/MATLAB
7	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
28	0,005	0	0,0048	0	1,042	0
56	0,045	0,0197	0,047	2,284	0,957	2,386
91	0,146	0,1313	0,149	1,112	0,980	1,135



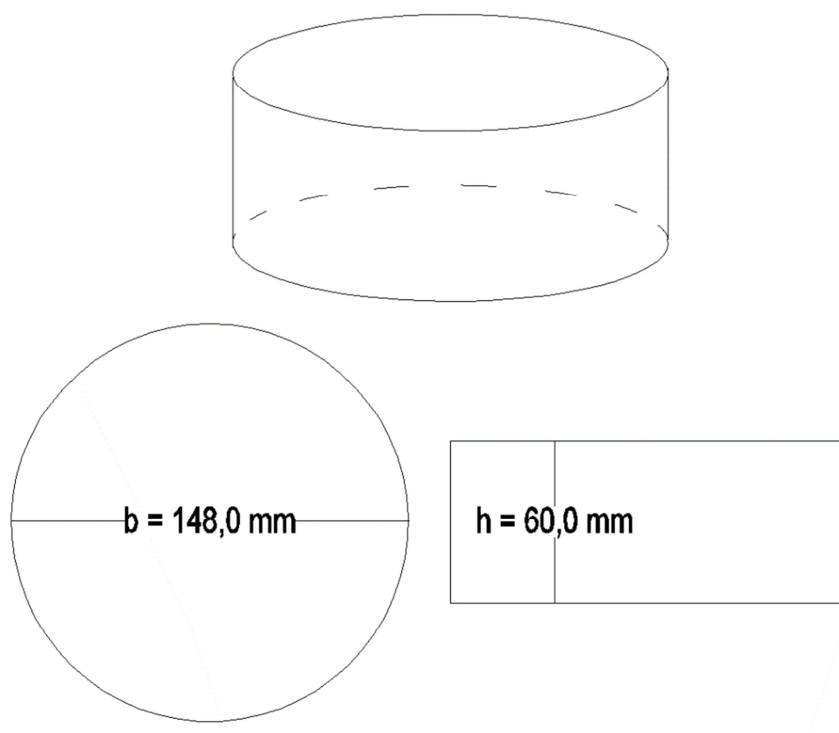
Obrázok 5.26 Grafický znázornené výsledne hodnoty koncentrácií pre betón HPC

Je jasné že namerané hodnoty pre betón HPC sa trochu líšia. Najväčší rozdiel je v období okolo 50 dňa, avšak ak by sme pokračovali s meraním výsledky by sa k sebe postupne približovali. Pri tomto betóne tiež nastalo, že v Matlabe sa niekedy hodnoty dostali do záporných čísel, hlavne v prvých dňoch, čo môže spôsobiť že neskôr výsledky nepatrne líšia.

Týmto meraním sme si overili že Matlab pracuje s dostatočnou presnosťou a môže byť využitý pre ďalší výskum.

## 6. Riešený príklad

V tejto kapitole budeme modelovať a porovnávať výsledky s laboratórnym meraním na prvku ktorý je zaťažovaný iba z vrchnej časti. Rozmery prvku sú znázornené na obrázku 6.1. Aby bolo vôbec možné porovnávať výsledky ktoré sme získali meraním, je treba do modelov pridať časovo závislý difúzny súčiniteľ ktorý zastupuje materiálové vlastnosti prvku v čase a preto môže ovplyvniť výsledky. Difúzny súčiniteľ bude použitý pri 2D výpočte v Matlabe. Rozdielnosť výsledkov porovnáme na 3D modeli v programe ANSYS WORKBENCH.



Obrázok 6.1 Schéma laboratórneho vzorku

### 6.1 Časovo závislý difúzny koeficient

V predchádzajúcom príklade (disk priemer 150mm, výška 25mm) bolo pri modelovaní počítané s konštantným difúznym súčiniteľom ktorý bol v čase nemenný. V tejto časti sa budeme snažiť zohľadniť difúzny koeficient ktorý bude premenný v čase.

Táto podkapitola čerpá zo znalosti a poznatkov ktoré sú uvedené v práci pána Ing. Lehnera [3], kde je popísaný postup implementovania časovo závislého difúzneho koeficienta do stávajúceho algoritmu. Účelom tohto riešenia je možnosť spresniť výpočet koncentrácie chloridových iónov, pre lepšie porovnanie s laboratórnymi skúškami.

### 6.1.1 Difúzny proces

Na začiatok je treba pochopiť rozdiel medzi časovo závislým a nezávislým difúznym súčiniteľom, preto je vhodné uviesť niektoré informácie s diplomovej práce [3]. Difúzia chloridových iontov patri medzi nestacionárne transportné procesy. Difúzna úloha môže byť popísaná systémom parciálnych diferenciálnych rovníc, ktoré môžeme následne riešiť variačnou metódou MKP [8]. Pri numerickom výpočte pomocou metódy konečných prvkov sa využíva rovnica druhého Fickovú zákona:

$$D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial t}, \quad /6.1/$$

pričom hľadanou neznámou je koncentrácia chloridových iontov  $C$  [%] a vstupnými parametrami sú:

- Difúzny súčiniteľ  $D_c$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- Hĺbka hľadanej koncentrácie  $x$  [m]
- Čas  $t$  [s].

Zmena koncentrácie v závislosti na čase  $t$  je vyjadrená členom  $\frac{\partial C}{\partial t}$ , krivosť v danom mieste  $x$  vyjadruje člen  $\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ .

### 6.1.2 Vývoj difúzneho súčiniteľa v čase

Koeficient chloridovej difúzie je funkciou času a teploty a Life-365[9] požíva nasledujúci vzťah na zohľadnenie časovo závislých zmien v difúzii. Ide to tú istú rovnicu ktorá bola použitá v diplomovej práci [3]

$$D_c(t) = D_{c,ref} \times \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad /6.2/$$

Kde:

- $D_{c(t)}$  je difúzny koeficient v čase  $t$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $D_{c,ref}$  je difúzni koeficient v konkrétnom počiatočnom čase  $t_{ref}$  [deň] napr. 28 dní od pôsobenia chloridov)
- $m$  konštanta ktorá je závislá od materiálových charakteristikách

V Life-365 [9] sa predpokladá, že ani popolček ani troska neovplyvnia koeficient difúzie v počiatočnom veku, ani hodnotu chloridového prahu. Avšak obidva materiálu

ovplyvňujú mieru zníženia difúznosti a teda aj konštantu  $m$ . Nasledujúca rovnica sa používa na úpravu hodnoty  $m$  na základe úrovne popoľčka [%FA] alebo trosky [%SG] v zmesi:

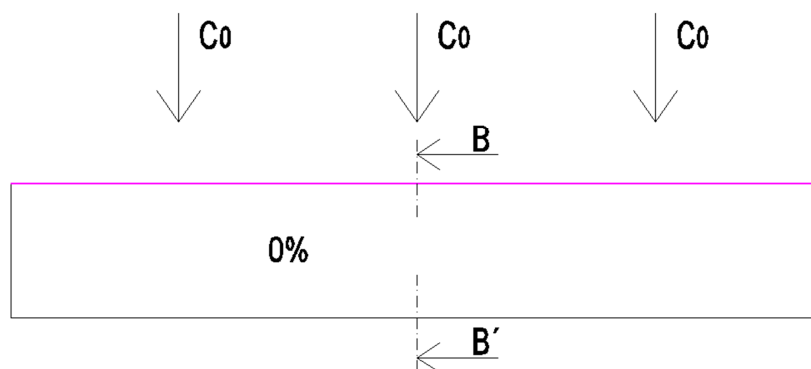
$$m = 0,2 + 0,4 \left( \frac{FA}{50} + \frac{SG}{70} \right) \quad /6.3/$$

Tento vzťah platí do náhradného množstva 50% popoľčka alebo 70% trosky, a teda  $m \leq 0,6$ . Model nebude počítat difúzne hodnoty (alebo predpovedať životnosť) pre vyššie úrovne týchto materiálov.

V práci [3] bol pre výpočet konštanty  $m$  porovnávaný postup podľa vzorca /6.3/, laboratórnych skúšok a metóda najmenších štvorcov [10]. Na základe tohto posudzovania bolo rozhodnuté použiť metódu najmenších štvorcov na výpočet konštanty  $m$ , nakoľko v porovnaní so laboratórnymi meraniami mala uspokojivejšie výsledky ako rovnica /6.3/.

## 6.2 Zat'azenie

Betónovú vzorku sme zat'azovali iba z vrchnej časti ako je uvedené v kapitole o laboratórnom meraní. Hodnoty povrchovej koncentrácie a difúzneho súčiniteľa ktoré boli použité pri modelovaní sme získali s laboratórnych meraní a sú uvedené v tabuľkách 3.1 a 3.2.

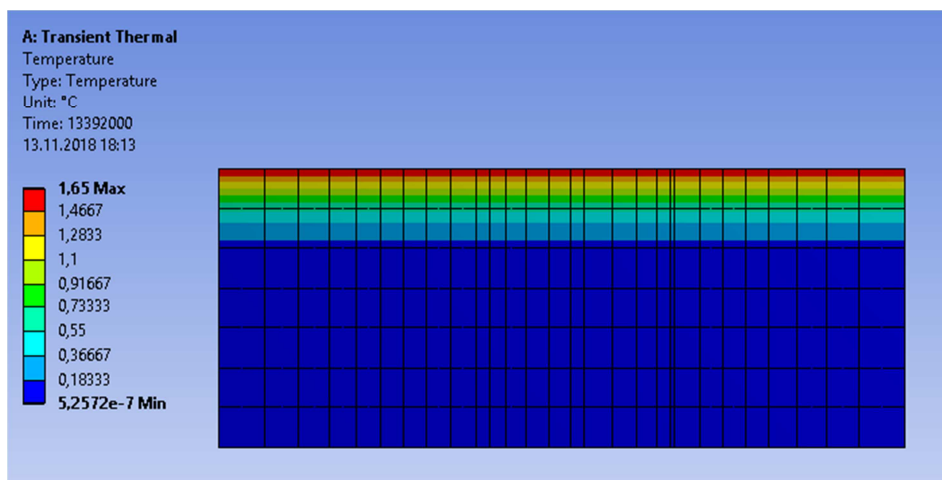


Obrázok 6.2 Schéma zat'azenia na betónovú vzorku

## 6.3 Porovnanie výsledkov

Bolo treba upraviť výpočetný algoritmus, geometriu, materiálové charakteristiky, zat'azenie a predovšetkým zapnúť výpočet pre časovo závislý difúzny koeficient. Nakoľko sa mi nepodarilo rozšíriť 3D model [1] do možnosti počítat s časovo závislým difúznym koeficient, hodnoty získane s merania sme posudzovali iba na výsledkoch získaných s Matlabu.

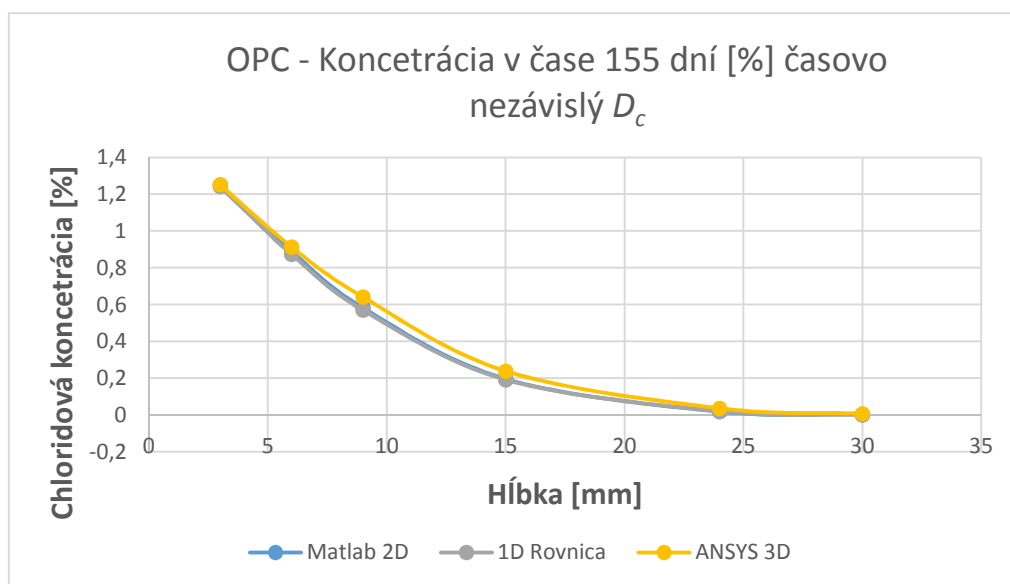
Pre kontrolu modelu boli porovnané výsledne hodnoty v čase 155 dní 1D rovnicou, 2D Matlabom a 3D modelom s programu Ansys Workbench. Všetky výpočty pracovali s časovo nezávislým difúznym súčiniteľom. Výsledky môžeme vidieť v tabuľke 6.1 a na obrázku 6.4.



Obrázok 6.3 Grafické vykreslenie chloridovej koncentrácie v čase 155 dní s programu Ansys Workbench

Tabuľka 6.1 Porovnanie výsledkov chloridovej koncentrácie v čase 155 dní

OPC - Koncentrácia v čase 155 dní [%] časovo nezávislý $D_c$			
Hĺbka [mm]	Matlab 2D	1D Rovnica	ANSYS 3D
3	1,2494	1,2415	1,2522
6	0,8895	0,8728	0,913
9	0,5825	0,5698	0,641
15	0,1954	0,1913	0,238
24	0,0179	0,0197	0,036
30	0,0016	0,0008	0,007

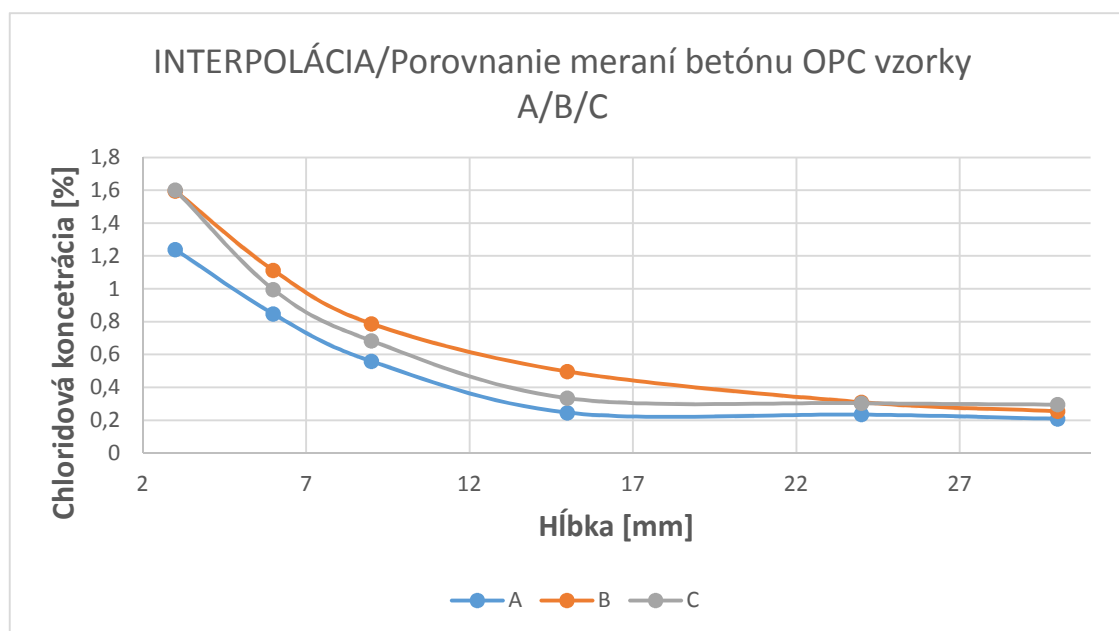


Obrázok 6.4 Grafické znázornenie výsledkov chloridovej koncentrácie v čase 155 dní

Keďže sa vždy nepodarilo odobrať vzorku betónového prášku v rovnakej hĺbke, bolo treba pomocou interpolácie prepočítať hodnoty na referenčné body ktoré boli pre betón OPC hĺbky : 3, 6, 9, 15, 24 a 30 mm a pre betón HPC hĺbky : 3, 6, 9, 12, 15 a 18 mm. Upravené hodnoty sú vypísané a grafický znázornené v tabuľke 6.2 a na obrázku 6.5.

Tabuľka 6.2 Hodnoty koncentrácií pre betón OPC v čase 155 dní po interpolácií

OPC - Koncentrácia v čase 155 dní /INTERPOLÁCIA					
A		B		C	
Hĺbka [mm]	Koncentrácia [%]	Hĺbka [mm]	Koncentrácia [%]	Hĺbka [mm]	Koncentrácia [%]
3	1,238557898	3	1,595297299	3	1,600816806
6	0,846492991	6	1,112217836	6	0,995056931
9	0,558917290	9	0,787280526	9	0,683582748
15	0,245895057	15	0,496292814	15	0,333836583
24	0,234504836	24	0,309191713	24	0,303970049
30	0,208457098	30	0,254089053	30	0,294830696



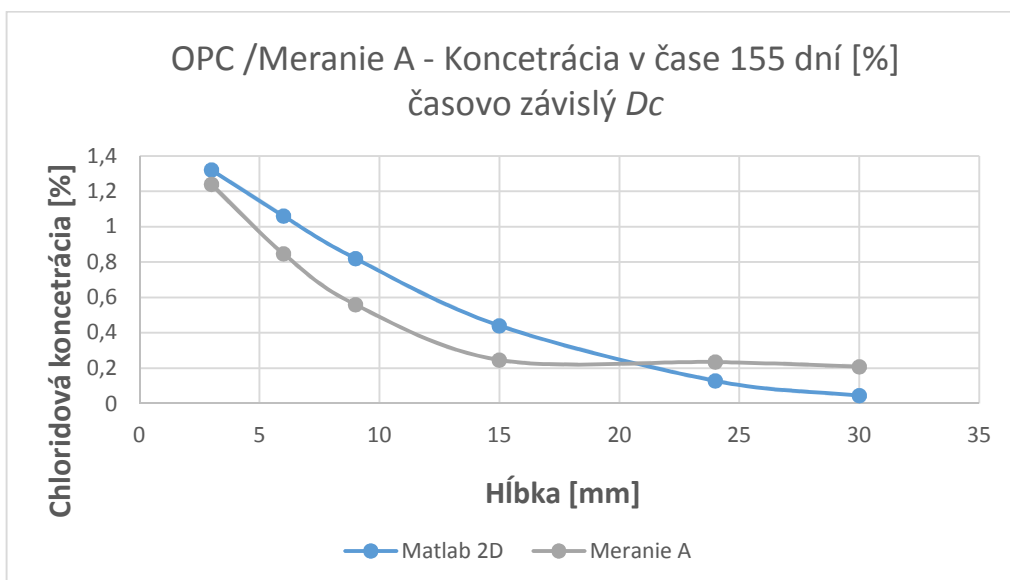
*Obrázok 6.5 Grafické znázornenie koncentrácií po interpolácii*

Po tom čo sme upravili hodnoty získane s laboratórneho merania môžeme porovnať tieto hodnoty s hodnotami získane s výpočetného algoritmu.



Tabuľka 6.3 Hodnoty chloridovej koncentrácia s programu Matlab a laboratórneho merania vzorky A

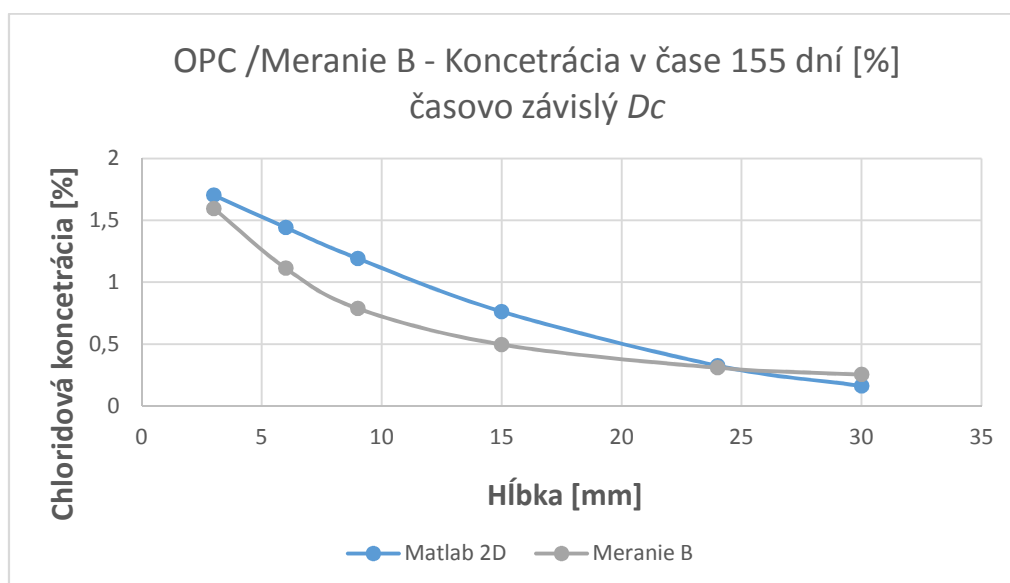
Porovnanie koncentrácia betónu OPC: Meranie A/Matlab			
Hĺbka [mm]	Matlab 2D	Meranie A	Matlab/Meranie A
3	1,3199	1,238557898	1,07
6	1,0597	0,846492991	1,25
9	0,8198	0,55891729	1,47
15	0,44	0,245895057	1,79
24	0,1281	0,234504836	0,55
30	0,0445	0,208457098	0,21



Obrázok 6.6 Grafické znázornenie rozdielu hodnôt s programu Matlab a s laboratórneho merania A

Tabuľka 6.4 Hodnoty chloridovej koncentrácia s programu Matlab a laboratórneho merania vzorky B

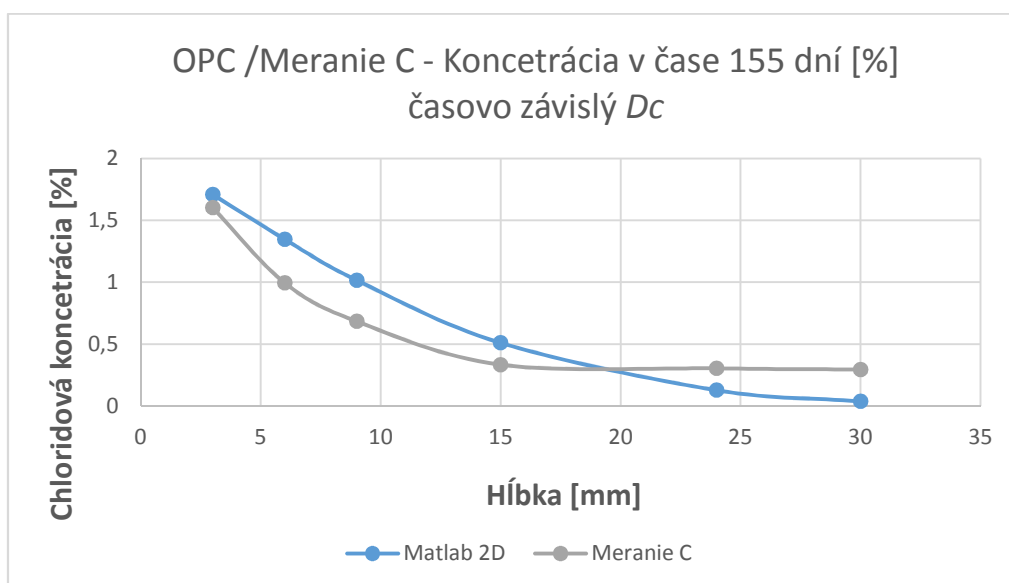
Porovnanie koncentrácia betónu OPC: Meranie B/Matlab			
Hĺbka [mm]	Matlab 2D	Meranie B	Matlab/Meranie B
3	1,7034	1,595297299	1,07
6	1,4405	1,112217836	1,30
9	1,1916	0,787280526	1,51
15	0,7627	0,496292814	1,54
24	0,3259	0,309191713	1,05
30	0,1619	0,254089053	0,64



Obrázok 6.7 Grafické znázornenie rozdielu hodnôt s programu Matlab a s laboratórneho merania B

Tabuľka 6.5 Hodnoty chloridovej koncentrácia s programu Matlab a laboratórneho merania vzorky C

Porovnanie koncentrácia betónu OPC: Meranie C/Matlab			
Hĺbka [mm]	Matlab 2D	Meranie C	Matlab/Meranie C
3	1,7079	1,600816806	1,07
6	1,3459	0,995056931	1,35
9	1,0158	0,683582748	1,49
15	0,5099	0,333836583	1,53
24	0,1276	0,303970049	0,42
30	0,0382	0,294830696	0,13



Obrázok 6.8 Grafické znázornenie rozdielu hodnôt s programu Matlab a s laboratórneho merania C

Z obrázkov 6.6, 6.7 a 6.8 môžeme poznať že hodnoty získané s výpočtového algoritmu ktorý pracoval s časovo závislým difúznym koeficientom  $D_c$  sú veľmi podobné, avšak nie úplne zhodné z hodnotami s laboratórnych meraní. Rozdiel môže byť zapríčinený ľudským faktorom ktorý je prítomný pri odoberaní vzoriek betónového prachu v rôznych hĺbkach vzorky, čo môžeme napríklad vidieť na obrázku 6.8 kde sa hodnoty s merania od hĺbky 20 mm do 30 mm prakticky nezmenili čo nezodpovedá realite. Tiež ale môžeme vidieť na výsledkoch že v hĺbke sa hodnoty k sebe približujú a znižuje sa rozdiel vo výsledkoch.

## 7. Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo vytvorenie funkčného 3D modelu, ktorý by správne simuloval prenikanie chloridových iontov do betónu. Model bol vytvorený v komerčnom programe ANSYS Workbench a jeho presnosť bola overená 1D rovnicou difúzie, upraveným algoritmom v Matlabe pre výpočet 2D zaťaženia a softvérovým programom ANSYS Mechanical APDL. Postup tvorby týchto modelov je presne popísaný v práci a slúži ako podklad pre tvorbu iných geometrií a materiálových vlastností. Tiež bolo potreba upraviť stávajúci algoritmus a to hlavne pri spôsobe zaťaženia na vzorku. Všetky tieto výpočty potvrdili funkčnosť 3D modelu.

V práci bol tiež vysvetlený postup odvodenia 2D prvku ktorý bol využitý vo výpočtovom algoritme v prostredí Matlab. Jedným z cieľov práce bolo rozšíriť stávajúci 2D numerický model do 3D modelu avšak, nastal problém pri odvodení tvarovej funkcie pre 3D konečný prvok, preto bol model vytvorený v programe ANSYS Workbench.

Bol popísaný postup laboratórne merania, vďaka čomu bol získané potrebné materiálové charakteristiky ako je difúzny koeficient  $D_c$  a  $m$ -faktor, ktorý zohľadňuje starnutie betónu v čase. Tiež bol uvedený výpočet časovo závislého difúzneho koeficienta ktorý preukázal že časom betón oveľa lepšie odoláva prenikaniu chloridov ako v prípade použitia konštantného difúzneho súčiniteľa. Bolo potvrdené že rôzne betóny rozdielne odolávajú chloridom, pričom sme porovnávali klasický betón označovaný OPC s vysokopevnostným betónom ktorý obsahoval prímеси trosky a popolčeka označovaný HPC. Výstupom bolo že vysokopevnostný betón preukazuje lepšiu odolnosť voči posypovým soliam.

## 8. Zoznam použitej literatúry

- [1]. P. Lehner. Numerické řešení 2D difuze chloridů užitím MKP. Ostrava: Bakalářská práce, Fakulta Stavební, VŠB-TUO, 2012.
- [2]. P.Konečný. Vyhodnocení trvanlivosti železobetonových mostovek s ohledem na vliv chloridů a na rozptyl vstupních parametrů, Habilitační práce, Fakulta stavební VŠB-TUO, 2015.
- [3]. P.Lehner. Pravděpodobnostní analýza s využitím izoparametrických konečných prvků, Ostrava: Diplomová práce, Fakulta stavební VŠB-TUO, 2013.
- [4]. Ansys 14.0, Release Documentation dostupné na: <<http://www.ansys.com>>, 2013.
- [5]. MatLab a MatLab, 7.10.0.854. 2010. místo neznámé : numerical computing environment, developed by MathWorks.
- [6] P.S. Mangat a B.T. Molloy. Prediction of Long Term Chloride Concentration in Concrete. Materials and Structures. 1994, vol. 27, issue 170, s. 338-346.
- [7] KONEČNÝ, P.: *Reliability of Reinforced Concrete Bridge Decks with Respect to Ingress of Chlorides*, Doktorská disertační práce, 2007
- [8] BROŽOVSKÝ, J. a MATERNA, A. Metoda konečných prvků ve stavební mechanice. Ostrava : dostupné online: , 2011.
- [9]. BENTZ, E. a THOMAS, M.D.A. Life-365 Service Life Prediction Model. Computer Program for Predicting the Service Life and Live-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed of Chlorides, 2001.
- [10]. Wikipedia. Metoda nejmenších čtverců, dostupné na:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_nejmen%C5%A1%C3%ADch\\_%C4%8Dtverc%C5%A1%C3%ADch](https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_nejmen%C5%A1%C3%ADch_%C4%8Dtverc%C5%A1%C3%ADch)
- [11] Ansys mechanical apdl thermal analysis guide  
[https://cae-club.ru/sites/default/files/commentsfiles/ansys\\_mechanical\\_apdl\\_thermal\\_analysis\\_guide.pdf.pdf](https://cae-club.ru/sites/default/files/commentsfiles/ansys_mechanical_apdl_thermal_analysis_guide.pdf.pdf)
- [12] NT build 443, Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration, Espoo, Finland, Nordtest (1995).
- [13] ČSN EN 14629. Stanovení obsahu chloridů v zatvrdlém betonu. Praha: ČNI, 2008.
- [14] X. LU. 1997. Application of the Nernst-Einstein Equation to Concrete, Cement and Concrete Research. 27(1): 293-302.
- [15] <http://fast10.vsb.cz/konecny/files/mkp/nestac.mac>

- [16] <https://www.ansys.com/academic/free-student-products/support-resourcesv>

## **9. Prílohy**

Zoznam príloh

- A. CD ROM s upraveným výpočtovým programom, grafické výstupy, video simulácia prenikania chloridov.

## Pod'akovanie

*Týmto sa chcem poďakovať vedúcemu diplomovej práce pánovi doc. Ing. Petru Konečnému, Ph.D. za konzultácie, trpezlivosť, ochotu cenné odborné usmernenia, bez ktorých by som túto prácu nezvládol v požadovanom rozsahu a kvalite.*

*Tiež by som sa rád poďakoval pánovi Ing. Petru Lehnerovi za pomoc s tvorbou modelu, a za neoceniteľné rady v oblasti programovania v prostredí Matlab, a za praktické ukážky laboratórnych meraní.*